



Universidade de Aveiro Departamento de Química

2017

**Daniela
Martins Lopes**

**OTIMIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DAS
PLACAS DE GESSO POR MANIPULAÇÃO
DE ESPUMAS**



Universidade de Aveiro Departamento de Química

2017

**Daniela
Martins Lopes**

OTIMIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DAS PLACAS DE GESSO POR MANIPULAÇÃO DE ESPUMAS

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, realizada sob a orientação científica do Doutor João António Baptista Pereira de Oliveira, Professor associado do Departamento de Química da Universidade de Aveiro e co-orientação do Engenheiro Paulo Jorge Soares Gomes, Engenheiro de Qualidade e Processos na empresa Gyptec Ibérica-Gessos Técnicos S.A.

Dedico este trabalho aos meus pais, Ivone Lopes e Armando Lopes, ao meu irmão, Gonçalo Lopes e ao meu namorado, Pedro Costa.

Agradeço por todo o apoio e força transmitida ao longo do meu percurso académico.

“A persistência é o caminho do êxito.” (Charles Chaplin)

O Júri

Presidente

Prof. Doutor Carlos Manuel Santos da Silva

Professor Auxiliar do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Doutora Isabel Maria Alexandrino Duarte

Investigadora Auxiliar do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor João António Baptista Pereira de Oliveira

Professor Associado do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

agradecimentos

É com muita satisfação que expresso aqui o meu agradecimento a todos aqueles que tornaram a realização deste trabalho possível.

Agradeço ao Engenheiro Luís Mota, por me receber na sua empresa e me dar a oportunidade de contactar com a realidade industrial, disponibilizando ótimas condições de trabalho para desenvolver o tema.

Agradeço ao Engenheiro Paulo Gomes, por ser um dos maiores pilares para a execução deste trabalho, pela forma que me propôs e expôs o tema, por toda a sua partilha de conhecimento e disponibilidade para me ajudar.

Agradeço à Engenheira Elsa Costa e à estagiária Eliana Silva pelo auxílio e conhecimento partilhado na realização dos testes de análise das propriedades das placas no laboratório de qualidade.

Agradeço aos colaboradores da empresa pelo bom ambiente e pela ajuda prestada na recolha das amostras, em especial ao Paulo Freire.

Ao Professor João Oliveira, por toda a sua ajuda e disponibilidade, e pelas suas correções e sugestões ao longo da realização desta dissertação.

À minha família, em especial aos meus pais, o meu maior agradecimento pelo apoio a todos os níveis. Ao Pedro Costa e à minha amiga Dora Ribeiro pelo apoio, amizade e encorajamento durante o meu percurso académico.

O meu sincero agradecimento por caminharem comigo nesta etapa.

Palavras-chave

Placas de gesso, Agentes espumantes, Otimização, Propriedades, Estrutura, Análise estatística.

Resumo

As placas de gesso são aplicadas na atualidade em paredes, tetos e divisórias de interiores. É importante que estas placas sejam leves para fácil manuseamento por parte dos aplicadores em obra, para obtenção de cargas mais leves e para poupança de água, gesso e energia no processo produtivo. Para tal, recorre-se à introdução de espumas na pasta de gesso. Para gerar espumas, é necessário que seja bem escolhido o agente espumante, que é misturado com água e ar comprimido no gerador, de forma a permitir melhorar as propriedades de resistência do produto final.

Na primeira parte do trabalho, é pretendido estudar a influência de duas características das espumas, o peso e o tempo de meia-vida, geradas a partir de várias misturas de referências de agentes espumantes nas propriedades das placas de gesso, onde é realizada uma análise estatística. Na segunda parte do trabalho, para um conjunto ampliado de misturas de referências de agentes espumantes na fabricação de espumas, é discutida a influência da densidade das espumas na resistência mecânica das placas, com o objetivo de prever o comportamento das espumas com base nos modelos de ajuste obtidos na primeira parte. É ainda estudado o efeito das espumas produzidas na resistência mecânica e na estrutura interna das placas de gesso, com vista à obtenção de placas mais resistentes mecanicamente.

É verificado que o tempo de meia-vida e o peso das espumas não são as variáveis responsáveis pelos valores obtidos nas propriedades das placas de gesso. Este estudo mostra que o agente espumante a utilizar deve ser escolhido de forma testada, uma vez que tem influência na resistência estrutural das placas. A dimensão e a distribuição das bolhas de ar presentes são os principais fatores responsáveis pela resistência estrutural, mostrando que a presença de vazios maiores interligados por paredes espessas de gesso, dispostos de forma mais organizada e próximos permite a obtenção de placas mais resistentes.

O objetivo principal do trabalho de otimização foi alcançado com a referência GFA02+12 % FA-403M, verificando-se um aumento percentual em 12,9 % da força transversal aplicada e 16,3 % da força longitudinal aplicada, em relação aos valores obtidos com a referência padrão 100 % GFA02 que tem sido utilizada até aos dias de hoje na Gyptec.

Key words

Wallboards, Foaming agents, Optimization, Properties, Structure, Statistical analysis.

Abstract

Wallboards are nowadays widely applied in walls, ceilings and interior partitions. It is important that these plates are lightweight for easy handling by on-site applicators, for lighter loads and also for saving water, plaster and energy in the production process. That can be reached by introducing foam into the plaster paste. In order to generate foams, it is necessary to choose the foaming agent, which is mixed with water and compressed air in the generator, in order to improve the resistance properties of the final product.

In the first part of this work it is intended to study the influence of two characteristics of foams, the weight and the half-life, manufactured from several mixtures of foaming agents in the properties of the plates, where a statistical analysis is performed. In the second part of this work, for an extended set of mixtures of foaming agent references in foam manufacturing, it is intended to study the influence of foam density on the mechanical strength of the plates with the objective to predict the behavior of the foams based on the adjustment models obtained in the first part. It is also studied the effect of foams produced on the mechanical strength and internal structure of the gypsum boards, in order to obtain more mechanically resistant plates.

It is verified that the half-life and the weight of the foams are not the responsible variables for values obtained in the properties of the gypsum boards. This study shows that the foaming agent to be used should be chosen in a tested manner, as it has influence on the structural strength of the plates. The size and distribution of the air bubbles are the main factors responsible for the structural resistance, showing that the presence of larger voids interconnected by thick walls of gypsum arranged in a more organized way and close manner way leads to the achievement of more resistant plates.

The main goal of the optimization work was reached with the reference GFA02 + 12 % FA-403M which leads to a percentage increase of 12,9 % of the applied transversal force and 16,3 % of the applied longitudinal force, in relation to the obtained values with the standard reference 100 % GFA02 that has been used to date in Gyptec.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABELAS	vi
NOMENCLATURA.....	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos e organização da dissertação.....	1
1.3. A empresa Gyptec Ibérica- Gessos Técnicos, S.A.....	2
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1.1. História do gesso e suas aplicações.....	3
2.1.2. Conceito e propriedades do gesso	4
2.1.3. Gesso FGD – subproduto industrial.....	4
2.1.4. Aditivos adicionados ao gesso	6
2.1.5. A transformação do gesso - desidratação térmica.....	7
2.1.6. A transformação do gesso - hidratação, presa e endurecimento	8
2.2. Placas de Gesso Laminado	10
2.2.1. História e conceito de placas de gesso	10
2.2.2. Tipos de placas de gesso	11
2.2.3. Processo de fabrico de placas de gesso.....	12
2.2.4. Propriedades e aplicações de placas de gesso.....	13
2.3. Espumas	14
2.3.1. Conceitos gerais e definição de espumas.....	14
2.3.2. Importância dos agentes espumantes na formação de espumas	15
2.4. Incorporação de espuma no fabrico de placas de gesso	16
2.4.1. Formação e vantagens de incorporar a espuma em placas de gesso.....	16
2.4.2. Método de introdução da espuma no processo de fabrico	17
2.4.3. Espumas estáveis e instáveis na indústria das placas de gesso	18
3. MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	21
3.1. Medição das características das espumas	21
3.1.1. Preparação das amostras	22
3.1.2. Medição do peso e do tempo de meia-vida das espumas	23

3.2.	Análise de propriedades das placas de gesso.....	24
3.2.1.	Preparação das amostras	24
3.2.2.	Humidade da placa	25
3.2.3.	Dureza superficial da placa.....	26
3.2.4.	Resistência mecânica à flexão	26
3.2.5.	Capacidade à absorção de água	27
3.2.5.1.	Absorção superficial de água	27
3.2.5.2.	Absorção total de água.....	28
3.3.	Análise da estrutura interna das placas de gesso.....	29
4.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1.	Influência da densidade e do tempo de meia-vida das espumas nas propriedades das placas de gesso	30
4.1.1.	Modelagem estatística da variável resposta, resistência mecânica à flexão transversal.....	31
4.1.2.	Modelagem estatística da variável resposta, resistência mecânica à flexão longitudinal.....	33
4.1.3.	Modelagem estatística da variável resposta, absorção total de água	35
4.1.4.	Modelagem estatística da variável resposta, dureza superficial	37
4.1.5.	Modelagem estatística da variável resposta, humidade.....	37
4.1.6.	Modelagem estatística da variável resposta, absorção superficial de água na face.....	38
4.1.7.	Modelação estatística da variável resposta, absorção superficial de água no verso.....	39
4.2.	Influência da densidade das espumas na resistência mecânica das placas de gesso.....	40
4.3.	Influência das misturas de agentes espumantes na resistência mecânica e na estrutura interna das placas de gesso	44
4.3.1.	Influência das misturas de tensioativos na resistência mecânica das placas de gesso...	44
4.3.2.	Influência das misturas de tensioativos na estrutura interna das placas de gesso.....	47
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	ANEXOS.....	59

A.1- Resultados da medição das características da espuma padrão líquida, 100 % GFA02	59
A.2- Resultados da medição das propriedades das placas com a incorporação da espuma padrão líquida, 100 % GFA02	60
A.3- Resultados da medição das características das espumas líquidas por mistura de referências de agentes espumantes à referência padrão, 100 % GFA02 em diferentes proporções	62
A.4- Resultados da medição das propriedades das placas por mistura de novas referências de agentes espumantes à referência padrão, 100 % GFA02 em diferentes proporções	63
A.5- Resultados da medição da densidade das espumas líquidas por mistura de novas referências de agentes espumantes à referência padrão, 100 % GFA02 em diferentes proporções	65
A.6. Resultados da medição da resistência mecânica das placas por mistura de novas referências de agentes espumantes à referência padrão, 100 % GFA02 em diferentes proporções	66
A.7. Gráfico típico da força-deformação para as amostras das seguintes produções: 2305171019; 2305171043; 2305171115; 2305171116; 2305171137; 2305171200; 2305171218.....	67
A.8. Gráfico típico da força-deformação para as amostras das seguintes produções: 2202171022; 0803170735; 0903171032; 0702172041;1002171326.	68
A.9. Gráfico típico da força-deformação para as amostras das seguintes produções: 2604171216;2604171231.	69
A.10. Gráfico típico da força-deformação para as amostras das seguintes produções: 1309171502; 1309171609; 1409171025; 1409171127.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-A empresa Gyptec, em Figueira da Foz ^[36]	2
Figura 2- Esquema de dessulfuração e formação de gesso na central termoeleétrica de Sines ^[14]	5
Figura 3-Formação de espécies à base de sulfato de cálcio em função do aumento de temperatura no forno. Adaptado ^[5]	7
Figura 4- Hidratação do hemi-hidratado em função do tempo. Adaptado ^[18]	9
Figura 5-Tipos de placas de gesso produzidas pela Gyptec: A- Padrão, B-Hidrófuga, C- Antifogo, D- Alta dureza, E- Gypcork, F- EPS, G- Protect. Adaptado ^[28]	11
Figura 6-Processo de fabrico das placas de gesso laminado. Adaptado ^[8]	12
Figura 7-Aplicação de placas de gesso em divisórias e tetos de edifícios. Adaptado ^[37] ..	14
Figura 8- Estrutura da espuma. Adaptado ^[28]	15
Figura 9-Composição de espuma, água e gesso na pasta de gesso. Adaptado ^[21]	17
Figura 10-Zonas de introdução de espuma no processo. Adaptado ^[28]	18
Figura 11-Recolha de amostras de espuma líquida para uma proveta (fotografia da autora).	22
Figura 12: A- medição do peso das amostras de espuma líquida, B- medição do tempo de meia-vida das amostras de espuma líquida (fotografias da autora).	24
Figura 13-Corte das amostras das placas de gesso com as dimensões indicadas para os testes laboratoriais.....	25
Figura 14- Ensaio de medição da humidade da placa de gesso com o higrómetro (fotografia da autora).....	25
Figura 15-Ensaio de medição da dureza superficial da placa de gesso: A-antes do lançamento, B- após colidir com a superfície da placa (fotografia da autora).....	26
Figura 16- Ensaio de medição da resistência à flexão de amostras de placas de gesso: A- Aplicação da força na placa, B – Rutura da placa (fotografias da autora).	27
Figura 17- Ensaio de medição da absorção superficial de água de amostras de placas de gesso (fotografia da autora).....	28
Figura 18- Ensaio de medição da absorção total de água de amostras de placas de gesso (fotografia da autora).....	29
Figura 19-Microscópio ótico para obtenção das fotografias da estrutura interna das placas de gesso (fotografia da autora).....	29
Figura 20-Gráfico dos valores de F_T experimentais em função dos valores de F_T previstos pelo modelo de regressão.	41
Figura 21-Gráfico dos valores de F_L experimentais em função dos valores de F_L previstos pelo modelo de regressão.	41

Figura 22- Valores médios da resistência mecânica à flexão transversal das placas em função da densidade das espumas líquidas.....	42
Figura 23-Valores médios da resistência mecânica à flexão longitudinal das placas em função da densidade das espumas líquidas.....	43
Tabela 17-Valores médios experimentais de força de resistência mecânica relativos à flexão transversal e longitudinal em função das várias formulações de tensioativos.	44
Figura 24-Valores de resistência mecânica à flexão transversal das placas para cada mistura de agente espumante.	45
Figura 25-Valores de resistência mecânica à flexão longitudinal das placas para cada mistura de agente espumante.	45
Figura 26-Fotografias das várias estruturas do interior das placas de gesso com as diferentes misturas de agentes espumantes.	47
Figura 27-Fotografias das estruturas com as espumas obtidas com os seguintes misturas de tensioativos: GFA02+80 % GFA03; GFA02+50 % GFA03; GFA02+50 % CS-230KE, 50 % GFA02+FA-403M e GFA02+80 % FA-403M.	48
Figura 28-Fotografias das estruturas com as espumas obtidas com os seguintes misturas de tensioativos: 100 % GFA02; GFA02+50 % PFM15 e GFA02+80 % PFM15.....	49
Figura 29-Fotografia da estrutura com a espuma 100 % GFA02 mostrando zonas com ausência de poros e sua distribuição muito irregular.....	50
Figura 30-Fotografias das estruturas com as espumas obtidas com os seguintes misturas de tensioativos: GFA02+12 % FA-403M; GFA02+ 9 % FA-403M, GFA02+4,5 % FA-403M e GFA02+1,5 % FA-403M.....	50
Figura 31-Fotografias das estruturas onde é visível as zonas com ausência de poros.	51
Figura 32-Fotografias das estruturas com as espumas obtidas com os seguintes misturas de tensioativos: GFA02+12 % FA-403M e 100 % GFA02.	51
Figura 33- Gráfico típico da força exercida na rutura da placa na face (longitudinal) e no verso (transversal), de onde foram obtidos os valores de força máxima para um conjunto de amostras.	67
Figura 34-Gráfico típico da força exercida na rutura da placa na face (longitudinal) e no verso (transversal), de onde foram obtidos os valores de força máxima para um conjunto de amostras.	68
Figura 35- Gráfico típico da força exercida na rutura da placa na face (longitudinal) e no verso (transversal), de onde foram obtidos os valores de força máxima para um conjunto de amostras.	69
Figura 36-Gráfico típico da força exercida na rutura da placa na face (longitudinal) e no verso (transversal), de onde foram obtidos os valores de força máxima para um conjunto de amostras.	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Tensioativos disponibilizados pelas empresas produtoras para o estudo identificados pelo seu nome comercial e suas características.	21
Tabela 2-Tensioativo padrão e misturas de tensioativos em diferentes proporções utilizados no estudo identificados pelo seu nome comercial.	23
Tabela 3-Valores médios experimentais obtidos das características de espumas e das propriedades de placas inseridos no software Minitab para realização da análise estatística.	30
Tabela 4-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis F_T e d_{esp} e F_T e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.	31
Tabela 5- ANOVA para o modelo F_T em função d_{esp} referente à resistência mecânica à flexão transversal.....	32
Tabela 6-ANOVA para o modelo F_T em função d_{esp} e o $t_{1/2v}$ referente à resistência mecânica à flexão transversal.....	32
Tabela 7-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis F_L e d_{esp} e F_L e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.	33
Tabela 8-ANOVA para o modelo F_L em função d_{esp} referente à resistência mecânica à flexão longitudinal.....	34
Tabela 9-ANOVA para o modelo F_L em função d_{esp} e o $t_{1/2v}$ referente à resistência mecânica à flexão longitudinal.....	35
Tabela 10-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis $Abstot$ e d_{esp} e $Abstot$ e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.	35
Tabela 11-ANOVA para o modelo $Abstot$ em função $t_{(1/2v)}$ referente à absorção total de água.	36
Tabela 12-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis Dur e d_{esp} e Dur e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.	37
Tabela 13-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis H e d_{esp} e H e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.	38
Tabela 14-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis Abs_{SF} e d_{esp} e Abs_{SF} e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.	38
Tabela 15-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis Abs_{SV} e d_{esp} e Abs_{SV} e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.....	39
Tabela 16-Valores médios de resistência mecânica à flexão transversal e longitudinal experimentais e valores de resistência à flexão transversal e longitudinal previstos.....	40

Tabela 18-Resultados obtidos das condições de operação, da medição do peso da espuma líquida, da densidade da espuma líquida e do tempo de meia-vida da espuma líquida com a referência 100 % GFA02 nas condições típicas de operação da fábrica.	59
Tabela 19-Resultados obtidos na medição da humidade das placas com a referência 100 % GFA02 para as cinco amostras recolhidas nas condições típicas de operação da fábrica...	60
Tabela 20-Resultados obtidos na medição da humidade das placas com a referência 100 % GFA02 para amostra nº 2305171019 nas condições típicas de operação da fábrica.....	60
Tabela 21-Resultados obtidos na medição da dureza, da resistência mecânica à flexão transversal, da resistência mecânica à flexão longitudinal, da absorção total de água, da absorção superficial de água na face e no verso das placas com a referência 100 % GFA02 para as cinco amostras recolhidas nas condições típicas de operação da fábrica.....	61
Tabela 22-Resultados obtidos na medição da dureza, da resistência mecânica à flexão transversal, da resistência mecânica à flexão longitudinal, da absorção total de água, da absorção superficial de água na face e no verso das placas com a referência 100% GFA02 para a amostra 2305171019 nas condições típicas de operação da fábrica.	61
Tabela 23-Resultados obtidos das condições de operação, da medição do peso das espumas líquidas, da densidade das espumas líquidas e do tempo de meia-vida das espumas líquidas por misturas de novas referências à referência padrão em diferentes proporções nas condições típicas de operação da fábrica.....	62
Tabela 24-Resultados obtidos na medição da humidade das placas com as variadas formulações obtidas por mistura de novas referências de agentes espumantes à referência padrão em diferentes proporções nas condições típicas de operação da fábrica.	63
Tabela 25-Resultados obtidos na medição da dureza, da resistência à flexão transversal, da resistência à flexão longitudinal, da absorção total e superficial de água nas placas no verso e na face com as variadas formulações obtidas por mistura de novas referências de agentes espumantes à referência padrão em diferentes proporções nas condições típicas de operação da fábrica.	64
Tabela 26-Resultados obtidos das condições de operação, da densidade das espumas líquidas e do tempo de meia-vida das espumas líquidas por mistura de novas referências à referência padrão em diferentes proporções nas condições típicas de operação da fábrica	65
Tabela 27-Resultados obtidos na medição da resistência à flexão transversal e da resistência à flexão longitudinal com as variadas formulações obtidas por mistura de novas referências	66

NOMENCLATURA

Abs_{SF}	Absorção superficial de água na face das placas (g.m^{-2})
Abs_{SV}	Absorção superficial de água no verso das placas (g.m^{-2})
Abs_{tot}	Absorção total de água nas placas (%)
A_{circ}	Área da secção circular da amostra onde é efetuado o teste (m^2)
d_{esp}	Densidade da espuma líquida (g.L^{-1})
Dur	Dureza obtida pela medição da marca esférica na superfície efetuada (mm)
F	Estatística F calculada para a regressão (adim)
F_L	Força longitudinal aplicada na face das placas (N)
$F_L \text{ Exp}$	Força longitudinal experimental para conjunto ampliado de tensioativos (N)
$F_L \text{ Mod}$	Força longitudinal prevista para conjunto ampliado de tensioativos (N)
$F_{parcial}$	Estatística F calculada na adição de uma nova variável ao modelo (adim)
F_T	Força transversal aplicada no verso das placas (N)
$F_T \text{ Exp}$	Força transversal experimental para conjunto ampliado de tensioativos (N)
$F_T \text{ Mod}$	Força transversal prevista para conjunto ampliado de tensioativos (N)
F_{tab}	Estatística F tabelado (adim)
$G.L$	Graus de liberdade (adim)
H	Humidade das placas (%)
m_c	Massa da espuma líquida e proveta (g)
m_{conj}	Massa média da espuma líquida e proveta (g)
m_{esp}	Massa da espuma líquida (g)
m_f	Massa final da amostra (g)

m_{prov}	Massa da proveta (g)
$M.Q$	Média quadrática (adim)
Q_{AGEsp1}	Caudal de agente espumante 1 (g.s ⁻¹)
Q_{AGEsp2}	Caudal mássico de agente espumante 2 (g.s ⁻¹)
$Q_{AguaEsp}$	Caudal mássico de água da espuma (kg.h ⁻¹)
Q_{Ar}	Caudal volumétrico ar (m ³ . h ⁻¹)
R	Coefficiente de correlação entre variáveis no ajuste (adim)
$S.Q$	Soma dos quadrados (adim)
$t_{(1/2)v}$	Tempo de meia-vida da espuma líquida (s)
V_{prov}	Volume da proveta (L)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

As placas de gesso são materiais de construção muito utilizados em paredes, tetos e divisórias de interiores^[1]. Estas devem ser leves, flexíveis, fáceis de mover e implementar por parte dos trabalhadores em obra, criando áreas e interiores agradáveis e de qualidade. A procura por placas de gesso está diretamente ligada ao desenvolvimento do setor da construção civil, em particular ao setor habitacional e comercial^[2]. Existem sete produtores de placas de gesso que detêm 80 % do mercado global, entre eles: BPB da Saint Gobain, Knauf, Lafarge, National Gypsum, US Gypsum Corporation e a Yoshino. Atualmente, os Estados Unidos constituem o maior mercado global de placas de gesso, seguido da Europa^[3]. A forte concorrência entre os produtores de placas de gesso está a direcionar as empresas a diferenciarem-se, procurando o desenvolvimento de soluções inovadoras. A busca pela inovação na indústria das placas de gesso prende-se por dois aspetos: o aparecimento de produtos de baixo peso com as suas propriedades melhoradas, e a otimização do processo de fabrico, racionalizando as operações ao longo dos ciclos de produção, com vista à redução no consumo de energia e a uma melhor utilidade das matérias-primas. Para obtenção de placas mais leves, recorre-se à introdução de espuma na pasta de gesso. Para retirar partido dos benefícios da presença de espuma, é necessário que o agente espumante que é adicionado na geração de espuma seja bem selecionado, de forma a melhorar as propriedades de resistência das placas de gesso^[4].

1.2. Objetivos e organização da dissertação

O presente documento trata da dissertação realizada em ambiente empresarial, no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Química. O trabalho decorreu nas instalações da empresa Gyptec Ibérica- Gessos Técnicos, S.A, localizada no parque empresarial da Figueira da Foz e que se dedica à produção de placas de gesso. O trabalho desenvolvido tem como principal objetivo a otimização de propriedades das placas de gesso por manipulação de espumas.

Na presente dissertação, os tópicos principais são organizados na seguinte ordem: o Capítulo 1, a introdução descreve a importância das placas de gesso, o enquadramento do

tema e o objetivo do trabalho. Neste capítulo é feita também uma breve apresentação da empresa onde foi realizado o estágio curricular. O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura que descreve a fundamentação teórica sobre o gesso, as placas de gesso e as espumas que são adicionadas ao processo de fabrico. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e os procedimentos experimentais adotados no presente trabalho, na medição das características das espumas e nos ensaios de controlo da qualidade das placas de gesso. No Capítulo 4 é realizada uma análise estatística para perceber a influência de dadas características das espumas nas propriedades das placas. É também discutida a influência das espumas produzidas a partir um conjunto ampliado de referências de agentes espumantes, nos valores de resistência mecânica e na estrutura interna das placas de gesso. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões dos estudos efetuados e sugestões de melhoria.

1.3. A empresa Gyptec Ibérica- Gessos Técnicos, S.A

A Gyptec é uma empresa pertencente ao grupo Preceram, de capital nacional que se dedica desde 2009 à produção de placas de gesso. Está posicionada estrategicamente no centro de Portugal, na Figueira da Foz contando com uma área de produção de 13500 m². Os seus produtos são processados pelo meio de matérias-primas ecológicas, através de métodos não poluentes e com visão ambientalmente e economicamente sustentável. Esta contribui para o desenvolvimento sustentável e para a conservação dos recursos naturais, uma vez que as matérias-primas utilizadas são o gesso FGD, subproduto das termoelétricas portuguesas e o papel reciclado. É feita a recolha seletiva dos restos das placas, sendo recicladas e recolocadas na produção. Do ponto de vista energético, é uma empresa sustentável, dado que a energia que é consumida na produção é rentabilizada pelo processo de cogeração. As placas encontram-se certificadas e reconhecidas pela sua qualidade, sendo destinadas à venda no mercado nacional e exportadas para o mercado espanhol.



Figura 1-A empresa Gyptec, em Figueira da Foz [36].

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta secção, pretende-se abordar numa perspetiva teórica, os principais conceitos relacionados com as temáticas seguintes: o gesso, as placas de gesso e as espumas adicionadas ao processo de fabrico na indústria das placas de gesso.

2.1.1. História do gesso e suas aplicações

O gesso é um dos materiais de construção mais antigos utilizados pela civilização humana, havendo crescente evolução do seu uso ao longo do tempo. Descobertas arqueológicas mostram que o gesso é utilizado pelo homem desde o nono milénio (9000 a.C.), pois foram encontrados vestígios deste material em ruínas na Turquia e na Síria. A partir dessa data, várias culturas (chineses, assírios e gregos) usavam o gesso para fins decorativos, obras de arte e estatuária. Os egípcios (3000 a.C.) utilizavam o gesso como argamassa na construção da Pirâmide de Queóps, e na idade média e no renascimento, era aplicado em decorações e criações artísticas. Após o século X d.C., o estuque passou a ser conhecido como “Plaster of Paris”, devido à existência de grandes depósitos de gesso em Paris. Desde esta altura, edifícios parisienses utilizavam o gesso como material de construção^[5]. Em Portugal, a partir do século XVI o gesso começou a ser utilizado como ornamento decorativo^[6]. No século XVIII passa a ser utilizado em solos como corretor da sua acidez^[5]. A partir do século XVIII, trabalhos de Lavoisier, de Van't Hoff e de Le Chatelier, dão a conhecer a desidratação da gipsite e hidratação do gesso^[6].

Na atualidade, o gesso é largamente usado em inúmeras atividades. É um material de maior aplicação na área da construção civil, pode ser utilizado na agricultura na correção de solos, na estatuária, na indústria cerâmica, na indústria de plástico e papel, e na medicina no tratamento de fraturas ósseas e na odontologia. Na construção civil, 80 % a 90 % do gesso é aplicado como material de revestimento de paredes e tetos de edifícios sob a forma de argamassas de reboco, na produção de placas de gesso e como aditivo retardador do endurecimento (presa) no cimento Portland^{[7][8]}.

2.1.2. Conceito e propriedades do gesso

O termo gesso deriva do latim *gypsum* e do grego *gypsos* que significa plaster ou cré^[6]. “Gipsite”, “Pedra de gesso”, “Gesso” são expressões usadas como sinónimos. “Pedra de gesso” ou “Gipsite” são os termos que mais se adequam para definir o mineral no seu estado natural, enquanto que “Gesso” é o termo usado para designar o produto obtido industrialmente através da calcinação do mineral^[9]. O gesso é o nome comum usado para designar um material de construção pertencente à família dos aglomerantes simples^[10]. É chamado de ligante hidrófilo aéreo por ser um ligante que misturado com água forma uma pasta que solidifica ao ar^[11]. Em termos químicos, o gesso é um material fino branco muito frequente do grupo dos sulfatos, constituído por sulfato de cálcio di-hidratado, de fórmula química $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ^[12]. É produzido pela conjugação de um material branco fino e água, hidrata e liberta energia num processo exotérmico, formando cristais de sulfato de cálcio di-hidratado entrelaçados, dando origem um produto rígido – o gesso. O gesso é caracterizado por ser um produto de fácil aplicação, inócuo e de boas propriedades de aderência. É bom isolante térmico e acústico, e resistente à deformação^{[13],[14]}. Devido ao seu comportamento térmico e acústico, os produtos de gesso contribuem para o conforto de milhões de pessoas e, tendo em conta a sua boa resistência ao fogo, contribuem ainda para a segurança dos edifícios^[7]. São caracterizados por baixo impacto ambiental e recicláveis, pois a composição química da matéria-prima nos produtos mantém-se inalterada. Deste modo, os resíduos de gesso poderão vir a ser aproveitados para fabricar de novo o mesmo produto, considerado um produto de construção sustentável^[12].

2.1.3. Gesso FGD – subproduto industrial

O principal substituto químico do gesso natural é o gesso FGD (Flue gas desulfurization), proveniente da dessulfurização de gases de combustão nas centrais termoelétricas portuguesas, as termoelétricas de Sines e do Pêgo^{[12],[16]}, sendo um subproduto químico idêntico ao gesso convencional produzido durante o tratamento dos efluentes gasosos^[5]. A técnica de dessulfuração é realizada por remoção de dióxido de enxofre (SO_2), oriundo da queima do carvão nas centrais termoelétricas. Estas emissões de dióxido de enxofre excedem os 200 milhões de toneladas/ano a nível mundial^[16]. Esta remoção de SO_2 , baseia-se no método calcário-gesso por via húmida. Esta técnica consiste em fazer reagir o dióxido de

enxofre no absorvedor na presença de uma suspensão à base de cálcio, por exemplo calcário moído (CaCO_3), fixando-se cerca de 90 % de SO_2 . No seguimento deste processo, obtém-se o gesso como subproduto, segundo a Equação 1.



A Figura 2, mostra um esquema de dessulfuração na central termoelétrica de Sines.

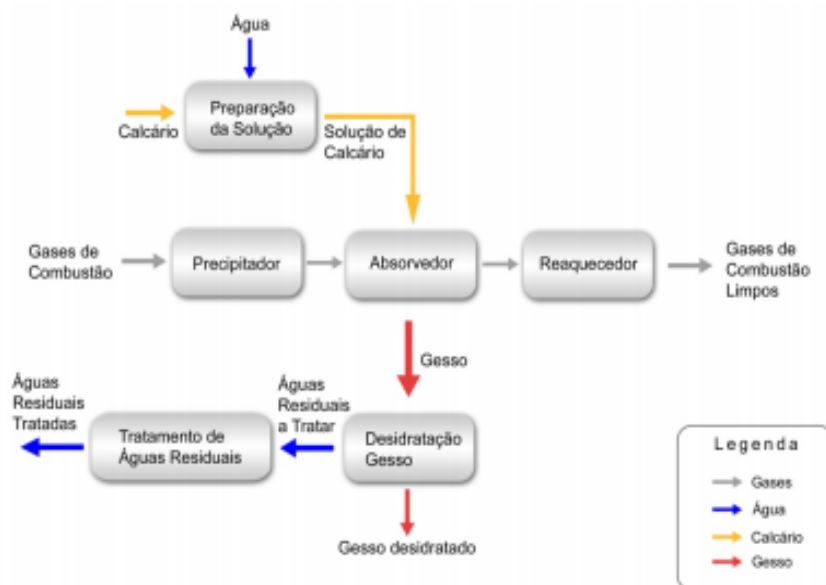


Figura 2- Esquema de dessulfuração e formação de gesso na central termoelétrica de Sines ^[14].

Esta prática de dessulfuração adotada nas termoelétricas portuguesas relaciona-se com a necessidade de redução de emissões de poluentes para valores compatíveis com o estabelecido pelas normas. Este procedimento diminui a libertação de gases de efeito de estufa para a atmosfera e permite a valorização do subproduto obtido limitando a extração do minério da natureza, que é um recurso não renovável, e diminui os impactos ambientais na disposição deste em aterro como resíduo^[16]. O uso do gesso FGD é uma forma sustentável para o desenvolvimento de soluções de construção, pois ao usar este gesso químico em substituição do gesso natural diminui-se a pressão sobre os recursos naturais^[18].

O gesso FGD é formado segundo os mesmos processos que o gesso natural, através de uma reação química com duração de poucas horas. Em termos de composição, os dois tipos de gesso são constituídos por sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Existem diferenças na pureza entre os dois, o gesso FGD tem pureza superior (96 % de teor em gesso) em relação ao gesso natural (80 % de teor em gesso)^[18] e um teor de humidade abaixo de 10

%^[19]. O gesso FGD tem um desempenho superior e um elevado teor de água em relação ao gesso natural, recomendando-se que este seja submetido a um tratamento prévio, acarretando o inconveniente de se formar anidrite solúvel durante o processo industrial^[19].

O gesso FGD é usado há 30 anos na fabricação de placas de gesso para todas as principais marcas na América do Norte e Europa^[18].

2.1.4. Aditivos adicionados ao gesso

Os aditivos são materiais incorporados em pequenas porções ao gesso calcinado com o objetivo de melhorar algumas das suas propriedades^[20]. Os aditivos podem ter função de:

- Retardadores- são substâncias com função inibidora da reação de hidratação do gesso, diminuindo a solubilidade do hemi-hidratado em água. Exemplo de retardadores: ácido cítrico, ácido bórico, ácido fosfórico, bórax.
- Aceleradores- são substâncias com função aceleradora da reação de hidratação do gesso, aumentando a solubilidade do hemi-hidratado em água. Exemplo: sulfato de potássio^[15], “ball mill accelerator (BMA)” – mistura de gesso hemi-hidratado e sacarose^[21].
- Espessantes- são substâncias que aumentam a consistência da pasta de gesso. Exemplo: amido.
- Retentores de água- são substâncias que retêm a água da mistura, existindo recristalização homogênea e diminuem a quantidade de água necessária à mistura. Exemplo: derivados de ésteres de celulose.
- Fluidificantes- são substâncias usadas para aumentar a fluidez da pasta, reduzindo a água na pasta de gesso. Exemplo: carbonato de cálcio, hidroxinaftaleno.
- Impermeabilizantes- são substâncias que impedem a passagem de água através dos poros na massa de gesso. Exemplo de impermeabilizante: silicone.
- Reforçadores de aderência: são substâncias usadas para aumentar a aderência dos cristais de gesso ao papel. Exemplo: amido, dextrose.
- Espumas líquidas - são adicionadas para modificar a pasta por lhe adicionar bolhas de ar^[15].

2.1.5. A transformação do gesso - desidratação térmica

O gesso FGD, subproduto das indústrias termoelétricas ou a “pedra de gesso”, extraída da natureza tem grande facilidade em perder e recuperar a sua água de cristalização^[22]. A perda de água é conseguida no processo de calcinação em fornos especiais, dando origem a compostos com mais ou menos moléculas de água, em função da temperatura de cozedura^[11]. A Figura 3, mostra a perda de água de cristalização e a formação de espécies à base de sulfato de cálcio em função do aumento de temperatura.

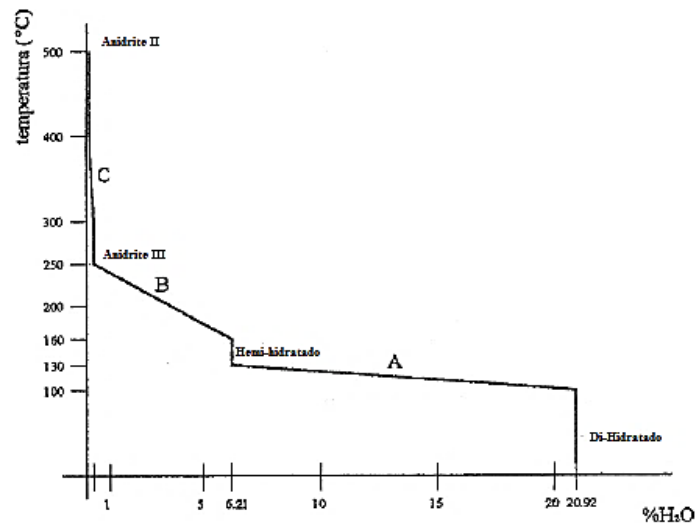
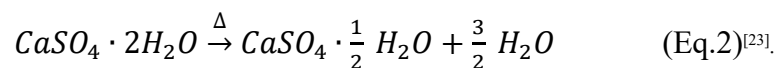


Figura 3-Formação de espécies à base de sulfato de cálcio em função do aumento de temperatura no forno. Adaptado ^[5].

- Entre 125 °C e 180 °C perde 75 % da sua água de cristalização, originando sulfato de cálcio hemi-hidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$, pela Equação 2. O gesso calcinado é mais solúvel em água do que o gesso bruto, de grande interesse comercial pela sua estabilidade química. Descrito pela etapa A na Figura 3.



Acima dos 180 °C, dá-se a perda total da água de cristalização do sulfato de cálcio di-hidratado, transformando-se em diferentes formas de anidrita (CaSO_4):

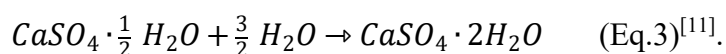
- Entre 180 °C e 250 °C, obtém-se anidrite III. É chamada de anidrite solúvel, CaSO_4 , é instável e ao absorver humidade atmosférica passa à forma de hemi-hidratado. A anidrite III é de presa rápida, usada como acelerador do tempo de presa. Industrialmente apresenta pouco interesse. Descrito pela etapa B na Figura 3.

- Entre 300 °C e 700 °C, obtém-se anidrite II. É chamada de anidrite insolúvel, pois é praticamente insolúvel. Descrito pela etapa C na Figura 3.
- Entre os 700 °C e 900 °C, obtém-se anidrite I. É bastante difícil a sua hidratação e não tem aplicação industrial.
- Acima dos 900 °C, ocorre a decomposição do sulfato de cálcio com geração de óxido de cálcio (CaO) e anidrido sulfúrico. Não tem utilidade industrial^{[5],[12]}.

Este processo de calcinação produz alterações químicas e físicas na matéria-prima, pelo que deve ser realizado em fornos que assegurem distribuição e desidratação uniforme do material. A calcinação pode ser obtida por duas formas por via seca ou húmida e o processo de calcinação pode ser direto ou indireto. Na calcinação direta os gases de combustão entram em contacto com a matéria-prima alimentada ao forno, enquanto na calcinação indireta os fornos são tubulares de cilindros concêntricos, e os gases quentes circulam no cilindro interno e o minério no cilindro externo^[15]. Para a calcinação utilizam-se os fornos rotativos tubulares, os fornos de caldeira e as autoclaves. A calcinação da gipsite pode dar-se em fornos à pressão atmosférica, obtendo-se o hemi-hidratado do tipo β ou dar-se em autoclaves, equipamentos fechados com maior pressão que a atmosférica, obtendo-se o hemi-hidratado do tipo α ^[9]. O gesso do tipo α tem um preço seis vezes mais elevado que o gesso β , tem uma estrutura cristalina mais homogênea, de baixa porosidade e mais resistente. É mais usado na odontologia, enquanto o gesso tipo β tem uma estrutura cristalina irregular, elevada porosidade, baixa resistência mecânica, tratando-se do tipo usado na construção civil e na indústria cerâmica^{[11],[18]}.

2.1.6. A transformação do gesso - hidratação, presa e endurecimento

O gesso FGD quando misturado com água origina rapidamente o sulfato di-hidratado^[11]. Esta mistura forma uma pasta homogênea, e após poucos minutos, torna-se consistente e trabalhável. A mistura adquire consistência até que endurece ganhando resistência, fenómeno seguinte à hidratação das espécies químicas^[22]. A reação identificada pela Equação 3, é exotérmica e expansiva.



O hemi-hidratado é mais solúvel do que o di-hidratado, libertando os iões Ca^{2+} e SO_4^{-2} , e ao fim de certo tempo precipita o di-hidratado de baixa solubilidade, pois atingiu-se a saturação

da solução. Os cristais de di-hidratado constituem-se em núcleos de cristalização onde os iões se vão depositando, propiciando o crescimento dos cristais que se entrecruzam em forma de agulhas e precipitam a partir da solução supersaturada. A hidratação ocorre em quatro etapas, visualizadas na Figura 4:

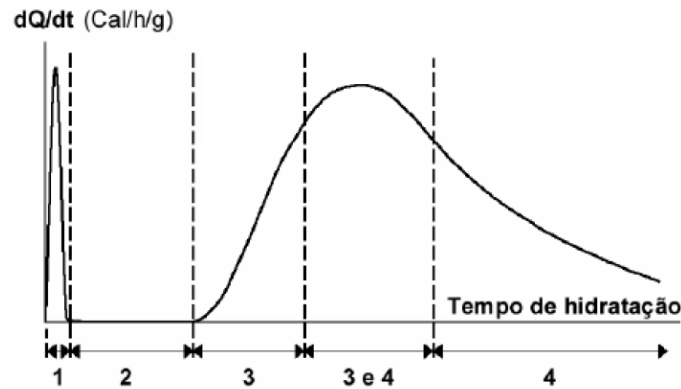


Figura 4- Hidratação do hemi-hidratado em função do tempo. Adaptado ^[18].

- Etapa 1-inicia-se com o contacto do pó de gesso na água. A água molha as superfícies, e inicia-se a dissolução. Com a dissolução do hemi-hidratado e atingida a saturação, constituem-se os microcristais pouco estáveis e de baixa solubilidade.
- Etapa 2 – inicia-se com o período inicial de indução. É nesta etapa que o hemi-hidratado se estabiliza química e fisicamente e começa-se a organizar constituindo núcleos de cristalização. A relação água/gesso, grau de agitação da pasta, tempo de mistura, tempo da água de mistura ou presença de impurezas ou aditivos influenciam esta etapa.
- Etapa 3- inicia-se com o período final de indução, o início da presa. A solução está sobressaturada e os iões vão se depositando sobre os núcleos de di-hidratado, proporcionando o crescimento dos cristais em forma de agulhas, que se entrelaçam e precipitam. Os cristais começam a ficar próximos, a porosidade diminui e a resistência aumenta. Ocorre um forte aumento da temperatura, indicando velocidade de reação elevada.
- Etapa 4- inicia-se com o fim da hidratação. Nesta etapa, há crescimento de cristais e a velocidade de reação vai-se reduzindo, uma vez que a concentração dos iões em solução está num valor baixo. Nesta etapa, o crescimento dos cristais influencia as propriedades mecânicas do gesso.

Na ausência de aditivos aceleradores ou retardadores, a hidratação está completa em duas horas, mas o material continua a ganhar resistência nas vinte horas seguintes^[22]. A presa e endurecimento da pasta de gesso dependem da: natureza dos compostos desidratados, temperatura e do tempo de tratamento térmico a que são sujeitos, tamanho das partículas de gesso, relação água/gesso, e da presença de aditivos e impurezas. A calcinação realizada a temperaturas elevadas, ou por um tempo de tratamento elevado conduz à obtenção de material de presa mais lento, e consequentemente de maior resistência mecânica. Em termos de finura, quanto mais moído o pó de gesso, maior a superfície de material exposto à hidratação, e consequentemente a presa será mais rápida e a resistência mecânica mais elevada. A presença de água utilizada na mistura de gesso influencia muito a presa e o endurecimento, porosidade e a resistência mecânica. Quanto menor a quantidade de água na relação água/gesso, menor é o tempo de presa e a porosidade, e maior a resistência mecânica. Se a presa é muito rápida, a pasta de gesso não é trabalhável, recomendando-se o uso de quantidade de água elevada. Quanto mais água se emprega, maior o tempo de presa trazendo o inconveniente de se obter resistência mecânica inferior e maior porosidade. O tempo de presa pode ser diminuído sem aumentar a água, usando aditivos retardadores^[24].

2.2. Placas de Gesso Laminado

2.2.1. História e conceito de placas de gesso

As conhecidas propriedades do gesso elegem com que seja um elemento muito popular na fabricação de placas de gesso. A produção das placas de gesso surgiu em 1890, nos Estados Unidos. Na Europa, a sua introdução foi na Inglaterra em 1917. A primeira fábrica surgiu em França e seguidamente na Alemanha. No ano de 1978 desenvolveu-se em Espanha o fabrico das placas através da marca Pladur®. Atualmente, as marcas principais de produção na Europa de placas de gesso são: Pladur®, Knauf®, Iberplaco®, existindo em Portugal duas fábricas na zona centro, a Fibroplac e a Gyptec^[6].

As placas de gesso são industrialmente formadas através de um processo de laminação contínua de uma mistura de gesso calcinado, água e aditivos entre as duas folhas de papel^[21].

2.2.2. Tipos de placas de gesso

No mercado existe uma enorme variedade de placas de gesso certificadas e reconhecidas internacionalmente pela sua qualidade de excelência, possibilitando desta forma a escolha da placa que se adeque melhor ao local onde é necessário instalá-la. Segundo a empresa Gyptec Ibérica, existem vários tipos de placas de gesso fabricadas pela mesma e disponíveis no mercado representadas na Figura 5.

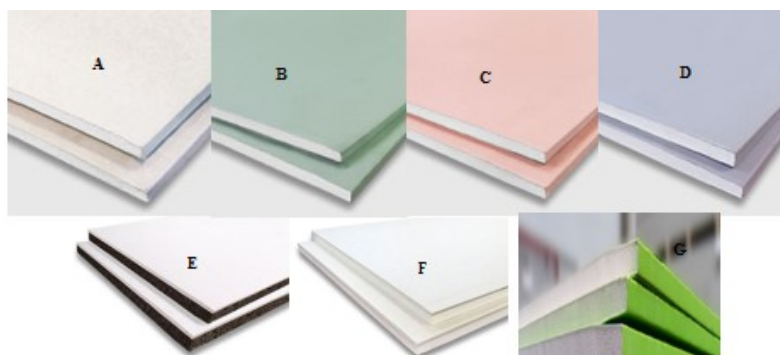


Figura 5-Tipos de placas de gesso produzidas pela Gyptec: A- Padrão, B-Hidrófuga, C- Antifogo, D- Alta dureza, E- Gypcork, F- EPS, G- Protect. Adaptado [28].

- Placa tipo A- *Padrão*- adequada ao tipo de obra seca, no interior de edifícios.
- Placa tipo H- *Hidrófuga*- adequada a zonas com humidade alta, por ter na sua constituição um agente hidrófugo, o silicone, que diminui a absorção de água.
- Placa tipo F- *Antifogo* – adequada para zonas que necessitem de maior resistência ao fogo, reforçada com fibra de vidro.
- Placa tipo D- *Alta Dureza*- adequada a zonas onde se torna necessário maior resistência contra impactos, por ter na sua constituição aditivos que lhe conferem maior dureza superficial.

As placas compostas, constituídas por uma placa de gesso e uma camada de um componente de isolamento agregado:

- Placa *Gypcork*- constituída por placa padrão ou hidrófuga e uma camada de isolamento em aglomerado de cortiça expandida, permite alto desempenho térmico e acústico.
- Isolamento *EPS*- constituída por placa padrão ou hidrófuga e uma camada de poliestireno expandido (EPS), adequada para isolamento térmico de paredes.

- Placa *Protect* - revestida por uma tela especial em fibra de vidro, em substituição do papel de cobertura, conferindo máxima proteção a zonas mais húmidas e de exposição ocasional à água.

2.2.3. Processo de fabrico de placas de gesso

O processo de fabrico das placas de gesso laminado é um processo industrial em contínuo, automatizado e controlado representado na Figura 6. Este processo segue diversas fases desde a receção da matéria-prima nas instalações fabris até ao armazenamento do produto final. Este implica quatro etapas: preparação do gesso (trituração e calcinação), mistura da pasta e formação da placa, secagem da placa, finalizando no armazenamento, carregamento e expedição^[16].

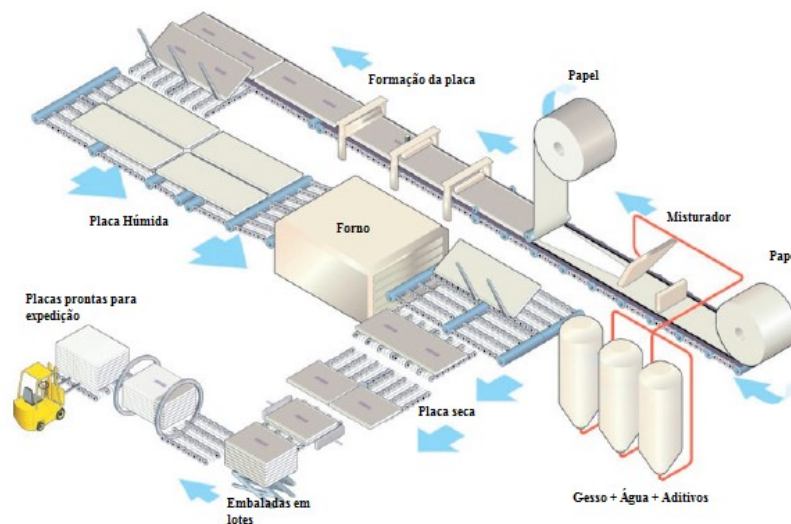


Figura 6-Processo de fabrico das placas de gesso laminado. Adaptado ^[8].

O processo de produção de placas inicia-se com a receção da matéria-prima na instalação fabril. Na primeira etapa do processo, a matéria-prima é esmagada e triturada pelos martelos do moinho até que as partículas de gesso formadas tenham 5 mm de diâmetro, tamanho adequado para a calcinação. As partículas de maiores dimensões são retidas num crivo e reencaminhadas para o processo de trituração. As partículas de gesso são sujeitas a um aquecimento térmico durante 60 minutos num forno tubular rotativo, a calcinação, a uma temperatura na ordem dos 800 °C e decresce até 160 °C, perdendo 15 % da água de cristalização. Após a calcinação das partículas de gesso, os moinhos de martelo reduzem o tamanho das partículas a 200 µm e são armazenadas na forma de pó em silos verticais. Na segunda etapa, é dada a fabricação das placas de gesso dividindo-se em mistura e

endurecimento da placa. O pó de gesso armazenado em silos é misturado com água e aditivos. São lançados em diferentes proporções a um misturador e através do movimento giratório, a pasta de gesso é homogeneizada. Quando esta atinge a consistência ideal é lançada sobre uma folha de papel de cobertura inferior, que está em cima de uma tela vibratória de movimento rápido. Seguidamente, é colocada uma folha de papel de cobertura superior e a placa passa no sistema de calandragem, de forma a garantir espessura e a largura uniforme. A placa movimenta-se na linha de produção, onde se dá a reação de hidratação e o endurecimento. É feito um controlo de dimensões para verificar as medidas, o peso e o controlo visual de modo a identificar defeitos no verso da placa, tais como: má aderência do papel, presença de rugosidades no papel e presença de curvas na placa. A placa com defeitos passa para a tela de rejeição. A placa em conformidade é cortada no comprimento desejado. Na terceira etapa, as placas cortadas dão entrada no secador e são mantidas no mesmo durante 45 minutos a 250 °C, para lhes retirar o excesso de água. Estas placas saem do secador e passam novamente por um controlo visual para identificar possíveis defeitos na face das placas. As placas com defeitos são encaminhadas para a tela de rejeição e as conformes são agrupadas duas a duas e é-lhes colocada uma identificação nos bordos transversais. Na quarta etapa, as placas são embaladas em lotes, rotuladas e colocadas em estrados para posteriormente seguirem para o armazém, de forma a serem enviadas ao cliente final^[1].

2.2.4. Propriedades e aplicações de placas de gesso

As placas de gesso são um material de construção muito utilizadas na construção civil por oferecerem vantagens em relação ao uso tradicional do tijolo e do cimento em paredes e tetos^[1]. As placas de gesso apresentam as seguintes propriedades:

- Isolamento acústico;
- Baixa condutividade térmica;
- Resistência à humidade;
- Resistência mecânica;
- Incombustíveis e eficientes em barreiras corta-fogo;
- Versáteis, duráveis e compatíveis com todo o tipo de acabamentos;
- Recicláveis^[16].

As placas de gesso são solução ideal para a construção nova e para a reabilitação [26]. Aplicam-se em processos de remodelação e de reabilitação de interiores de edifícios, nomeadamente na execução de divisórias interiores e no isolamento de paredes e tetos falsos, como se observa na Figura 7. Estas otimizam espaços, conseguindo-se divisões de espessura muito reduzida com isolamento térmico e acústico superior à de uma parede de tijolo simples. Podem incorporar tubos de instalações no seu interior e recebem qualquer tipo de decoração, como pintura, papel de parede e azulejos cerâmicos^[1]. São resistentes e seguras, por apresentarem resistência às chamas e ao impacto. Permitem criar conforto térmico e acústico no interior de edifícios, reduzem as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento e modernizam espaços antigos com arquitetura moderna^[12].



Figura 7-Aplicação de placas de gesso em divisórias e tetos de edifícios. Adaptado^[37].

2.3. Espumas

2.3.1. Conceitos gerais e definição de espumas

As espumas são comuns na sua ocorrência e uso, existindo a necessidade de controlar a sua qualidade e características, como a distribuição do tamanho das bolhas na espuma e a estabilidade da espuma durante a utilização ou armazenagem. Estas são de grande interesse prático pela presença das mesmas em produtos de limpeza e higiene pessoal, em champô e sabões e em extintores^[27].

As espumas gás-líquido são sistemas coloidais formadas por bolhas de gás separadas por filmes líquidos. Estas constituem-se na presença de agitação, onde o gás é disperso numa fase líquida contínua. A estrutura da espuma a duas dimensões está representada na Figura 8. Não existe uma nítida divisão entre o gás e o líquido, mas uma região de interface designada de superfície de Gibbs. A lamela engloba os dois filmes finos de líquido e parte

da junção das lamelas córneas. Estas três lamelas córneas fazem um ângulo de 120° , conhecido por fronteira de Plateau.

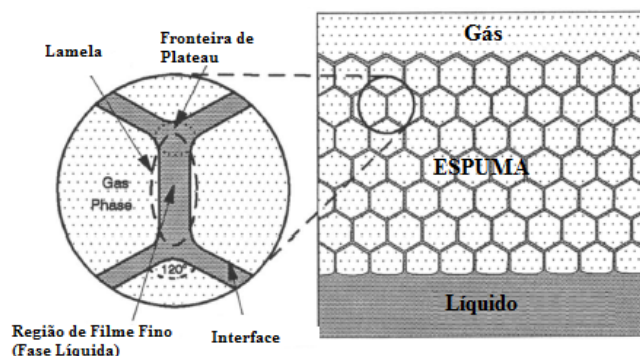


Figura 8- Estrutura da espuma. Adaptado^[28].

2.3.2. Importância dos agentes espumantes na formação de espumas

Os líquidos puros geram espumas termodinamicamente instáveis, que se quebram instantaneamente no momento da sua criação. A membrana de interface que compõe as bolhas na espuma rompe-se e o líquido drena. Por diferenças de densidade, a fase gasosa sobe e a fase líquida é mais densa tende a descer, devido à sua forte tendência em separar-se e escoar dentro do corpo principal da espuma. Por este fato, as espumas para apresentarem alguma resistência à drenagem do líquido no interior da espuma são constituídas por gás, líquido e agente espumante.

Os agentes espumantes são denominados por surfactantes ou tensioativos. É comum adicionar tensioativos em baixas concentrações à fase líquida, adsorvendo-se na interface gás/líquido^[28]. Os agentes espumantes são utilizados com o principal objetivo de promover a durabilidade e estabilidade do filme que separa o gás do líquido por fortalecerem o filme contra o adelgaçamento excessivo, fornecendo mais estabilidade às espumas^[29]. Estes tensioativos têm um papel relevante na redução da tensão superficial da água por minimizarem as forças de coesão entre as moléculas da água, na formação de área interfacial aumentada com um valor mínimo de trabalho na formação da espuma e na constituição de película protetora na superfície das bolhas, de forma a prevenir a coalescência com outras bolhas vizinhas.

Os tensioativos são constituídos por duas zonas, uma polar e outra apolar. A região polar é hidrofílica e tem afinidade por água. A região apolar é hidrofóbica ou lipofílica e tem uma

forte afinidade por moléculas apolares^[28]. Os tensioativos são classificados segundo zona polar que o constitui: aniônicos (carga negativa), catiónicos (carga positiva), não-iônicos (sem carga) e anfotéricos (carga positiva e negativa). Os agentes espumantes podem apresentar variações na sua química, no tamanho das ramificações da porção hidrofílica ou lipofílica e consequentemente, influenciar a estabilidade e características da espuma formada^[30].

2.4. Incorporação de espuma no fabrico de placas de gesso

2.4.1. Formação e vantagens de incorporar a espuma em placas de gesso

No fabrico de placas de gesso é comum incorporar espuma à mistura da pasta de gesso. A espuma é pré-gerada a partir da combinação de um agente espumante líquido e água. A corrente de mistura pré-gerada é conduzida e passa através de um gerador de espuma onde é agitada com ar comprimido, produzindo de forma contínua a espuma aquosa, que é seguidamente misturada na pasta de gesso. A espuma aquosa é combinada uniformemente na pasta de gesso criando bolhas de ar, denominado de gesso espumado ou leve. Esta espuma incorporada produz uma distribuição uniforme de vazios na placa de gesso, se as bolhas na pasta de gesso não desaparecerem antes do gesso sofrer endurecimento^[31].

A espuma é adicionada à pasta de gesso com seguintes objetivos:

- Diminuir o peso das placas de gesso;
- Reduzir a quantidade de água necessária para tornar a pasta fluida e a energia na secagem da placa na eliminação da quantidade excessiva de água;
- Reduzir a quantidade de gesso utilizado no fabrico;
- Minimizar o custos das placas de gesso ^[32].

Segundo a empresa “GEO Speciality Chemicals”, a combinação da pasta de gesso com espumas é constituída por: 48 % em espuma, 25 % em gesso e 27 % em água, ilustrado na Figura 9^[21].

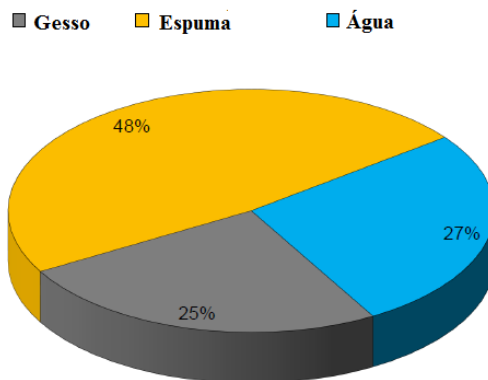


Figura 9-Composição de espuma, água e gesso na pasta de gesso. Adaptado [21].

2.4.2. Método de introdução da espuma no processo de fabrico

Existem alguns problemas associados à incorporação das espumas no processo de fabrico das placas. Habitualmente a espuma gerada mantém-se ativa por períodos de tempo muito reduzidos, pois as bolhas de espuma rebentam pouco tempo após a sua formação, ou coalescem umas com as outras formando bolhas maiores que acabam por se romper pouco tempo após a sua formação. Estes fenómenos são mais evidentes quando as espumas entram em contato com a pasta de gesso, mesmo que o agente espumante produza espuma estável. Por este facto, é importante: (i) minimizar o tempo entre a formação da espuma e a formação do gesso endurecido, preservando-se os vazios criados no gesso pela espuma; (ii) reduzir o grau de agitação a que a espuma é sujeita na mistura com a pasta, uma vez que o elevado grau de agitação no misturador pode ser a causa da coalescência e da rutura das bolhas, possibilitando ao aparecimento de vazios não uniformes na placa de gesso. A perda de espuma devido à agitação elevada pode ser compensada pelo aumento da quantidade de agente espumante esperando-se que resista espuma suficiente para dispersar na pasta, proporcionando vazios desejados e na efetiva redução do peso da placa. Acontece que o aumento da quantidade de agente espumante traduz-se em custos elevados. A forma mais viável é ter um grau de agitação da espuma adequado a conseguir uma dispersão da espuma de modo relativamente uniforme na pasta de gesso, reduzindo a perda de espuma e bolhas de ar com tamanhos não homogéneos.

O método preferido de inserção de espuma no processo consiste na introdução da espuma através de zonas estratégicas que possibilitam que esta sofra menor agitação do que a mistura da pasta de gesso para reduzir a sua destruição, enquanto é espalhada uniformemente na

pasta. A introdução da espuma como observado na Figura 10, é dada em vários pontos de inserção: primeira inserção de espuma (30) na única câmara de mistura (10) posicionada num ponto afastado relativamente às entradas de gesso calcinado (20) e água (22), junto da saída de descarga do misturador; existem duas inserções de espuma (34,36) em duas condutas de descarga auxiliares (46,48) ligadas à saída de descarga principal do misturador, porque devido à entrada da espuma no misturador no ponto (30) perto da saída de descarga, muito pouca espuma migra para a zona (44); e uma quarta inserção de espuma (32) junto à saída de descarga principal do misturador (42). Esta inserção de espuma nas zonas mencionadas permite que a espuma experimente menos agitação que a pasta de gesso no misturador, espalhando-se eficaz e uniformemente na pasta de gesso. Utilizando esta técnica reduz-se o inconveniente de perda de espuma, diminui-se problemas de tamanhos de bolhas não uniformes e minimiza-se o consumo de agente espumante no processo^[31].

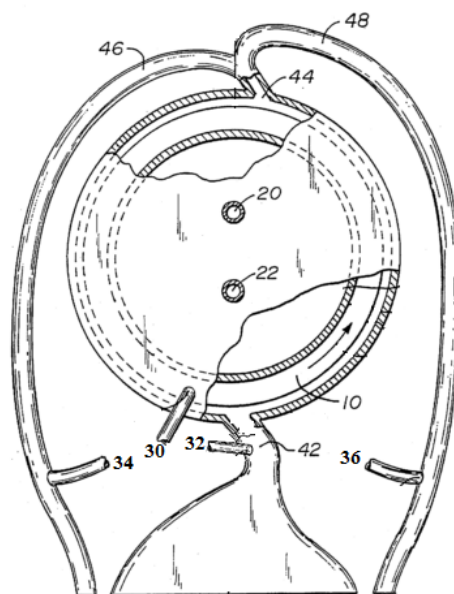
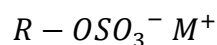


Figura 10-Zonas de introdução de espuma no processo. Adaptado^[28].

2.4.3. Espumas estáveis e instáveis na indústria das placas de gesso

Segundo a patente Nº US 5643510A, um agente espumante estável refere-se a um agente espumante que dá origem a bolhas de ar de menores dimensões e um agente espumante instável refere-se a um agente espumante que dá origem a volumes abundantes de espuma, tornando-se instável em contacto com a pasta de gesso. Estas espumas formadas por agentes espumantes instáveis são espumas em que as bolhas coalescem, constituindo-se bolhas de maior dimensão^[33].

Um exemplo de um tipo de agente espumante usado para formar espumas instáveis compreende um sulfato de alquilo e tem a seguinte fórmula química:



Onde R é um grupo alquilo com comprimento da cadeia de 8 a 12 átomos de carbono e M é um catião. Os agentes espumantes estáveis não são usados de forma isolada por ser necessário elevadas quantidades. Um exemplo de um tipo de agente espumante usado para formar espumas estáveis compreende um éter sulfato de alquilo e tem a seguinte fórmula química:



Onde X está entre 2 a 20, Y é 0 em 86 % a 99 % do peso do agente espumante e M é um catião^[31]. Existem agentes espumantes produzidos por ajuste de proporções de um componente estável, um éter sulfato de alquilo e um componente instável, um sulfato de alquilo. Esta combinação de dois agentes espumantes, um estável e outro instável em variadas proporções, é a chave principal para controlar o tamanho dos vazios criados pela espuma na estrutura da interna da placa de gesso^[33], uma vez que as bolhas geradas apresentam viscosidade intermédia do líquido presente no filme fino que as envolve. Estes líquidos com intermédia viscosidade têm uma intermédia velocidade de drenagem, evitando-se o escoamento dos líquidos em tempos muito curtos ou muito longos. Estes líquidos têm uma velocidade adequada, sendo designadas por espumas de intermédia estabilidade e as bolhas presentes têm dimensão intermédia. Já os líquidos muito viscosos originam uma baixa velocidade de drenagem do líquido no filme fino demorando muito tempo na aproximação à concentração de equilíbrio, originando espumas de elevada estabilidade e as bolhas geradas têm menor dimensão. Os líquidos de baixa viscosidade originam uma elevada velocidade de drenagem do líquido no filme fino, originando espumas de baixa estabilidade e as bolhas presentes têm maiores dimensões.

Segundo a patente mais recente N° WO2012136760, as bolhas de ar de menor dimensão na placa de gesso são geradas por espumas de elevada densidade e as bolhas de maior dimensão são geradas por espumas de baixa densidade^[34].

A avaliação do desempenho do agente espumante relaciona-se com a capacidade que este tem em arrastar o ar para dentro da pasta de gesso e na sua capacidade de produzir volumes abundantes de espuma^[35].

A modificação de espumas pode ser dada por alteração de parâmetros químicos ou físicos. A alteração de espumas por alteração de parâmetros químicos consiste no ajuste das quantidades relativas dos diferentes constituintes químicos da espuma. Estas podem também ser modificadas por alteração de parâmetros físicos como por exemplo, o fluxo de ar introduzido no gerador. Estas modificações são efetuadas de forma a controlar a estrutura da espuma que influencia a estrutura e as propriedades da placa produzida^[34].

3. MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente capítulo tem com finalidade descrever os materiais e procedimentos experimentais utilizados na empresa no período de estágio. Na primeira parte experimental procede-se à medição de duas características das espumas líquidas, e na segunda parte experimental realiza-se o controlo da qualidade do produto final no laboratório da Gyptec, onde se executa ensaios de análise às propriedades das placas com as várias espumas adicionadas.

3.1. Medição das características das espumas

Para a realização da medição das características de espumas líquidas foi elaborado um levantamento das empresas que produzem misturas líquidas de compostos químicos para aplicação em pasta de gesso, os chamados agentes espumantes. As empresas contactadas disponibilizaram-nos para este estudo diversos agentes espumantes cujo o nome comercial e algumas das suas características são apresentadas na Tabela 1. A sua identidade e composição química não nos é facultada, encontrando-se em segredo comercial.

Tabela 1- Tensioativos disponibilizados pelas empresas produtoras para o estudo identificados pelo seu nome comercial e suas características.

Marca	Nome comercial	Características dos tensioativos
Stepan	GFA02 - PADRÃO	Tensioativo aniónico; Viscosidade – 0,36 kg/m. s; Densidade – 1042,4 kg/m ³ ; Ponto Ebulição > 93,9 °C;
Stepan	FA-403M	Tensioativo aniónico; Viscosidade - 0,075 kg/m. s; Densidade – 1004,1 kg/m ³ ; Ponto de ebulição > 94,0 °C;
Stepan	GFA01	Tipo de tensioativo desconhecido; Viscosidade - 0,1 kg/m. s; Densidade – 1066,39 kg/m ³ ; Ponto de ebulição > 93,9 °C;
Stepan	CS-230KE	Tensioativo aniónico; Viscosidade – 0,37 kg/m. s; Densidade – 1040,0 kg/m ³ ; Ponto Ebulição > 94,0 °C;
Stepan	GFA03	Não encontradas características
Geo	PFM15	Tipo de tensioativo desconhecido; Viscosidade - 0,1 kg/m. s; Densidade – 1054,4 kg/m ³ ; Ponto de ebulição > 100 °C;

3.1.1. Preparação das amostras

Na preparação das amostras de espumas líquidas, começou-se por adicionar o agente espumante líquido ao gerador da espuma. Foram ajustadas as condições de operação, nomeadamente: o caudal de água da espuma, o caudal dos agentes espumantes em uso, o caudal de ar e a pressão das bombas dos geradores de espuma, de forma a que em todos os ensaios as condições de operação se mantivessem aproximadamente constantes, nos valores típicos em que a fábrica opera: caudal de água da espuma em 1150 kg/h, o caudal de ar em 15,50 m³/h e a pressão das bombas 1 e 2 em 3,8 bar e 4,0 bar, respetivamente. Deixou-se que o sistema estabilizasse durante uns minutos para conseguir-se expulsar a espuma acumulada no sistema proveniente dos ensaios anteriores. Recolheram-se as amostras de espumas líquidas para uma proveta de plástico com capacidade de 1 L, como ilustrado na Figura 11.



Figura 11-Recolha de amostras de espuma líquida para uma proveta (fotografia da autora).

Neste estudo começou-se por gerar espumas padrão 100 % GFA02. De seguida, produziram-se espumas por mistura de dois tensioativos em diferentes proporções, tendo sempre como referência padrão GFA02, à qual foram adicionados os seguintes tensioativos: PFM15, CS-230KE, FA-403M, GFA03 e GFA01. As várias misturas de tensioativos e as suas proporções definidas em percentagem mássica podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2-Tensioativo padrão e misturas de tensioativos em diferentes proporções utilizados no estudo identificados pelo seu nome comercial.

Nome comercial
100% GFA02 - PADRÃO
GFA02+50 % PFM15
GFA02+80 % PFM15
GFA02+50 % CS-230KE
50 % GFA02+ FA-403M
GFA02+80 % FA-403M
GFA02+ 50 % GFA03
GFA02+ 80 % GFA03
GFA02+ 50 % GFA01
GFA02+1,5 % FA-403M
GFA02+4,5 % FA-403M
GFA02+9 % FA-403M
GFA02+12 % FA-403M

3.1.2. Medição do peso e do tempo de meia-vida das espumas

No trabalho experimental, efetuou-se a medição de duas características das espumas líquidas: o peso e o tempo de meia-vida. Para tal, retiraram-se quatro amostras de espuma para uma proveta e mediu-se numa balança digital o peso do conjunto (peso da proveta e da espuma). A massa da espuma (g) é obtida por diferença entre o peso médio do conjunto e o peso da proveta pela Equação 4:

$$m_{esp} = m_{conj} - m_{prov} \quad (\text{Eq.4}).$$

A densidade da espuma ($\frac{g}{L}$) é obtida através do quociente entre a massa da espuma e o volume da proveta pela Equação 5:

$$d_{esp} = \frac{m_{esp}}{V_{prov}} \quad (\text{Eq.5})$$

Na recolha da quarta amostra de espuma, no momento exato em que se começou a encher a proveta, colocou-se o temporizador a contabilizar o tempo. O tempo de meia-vida é definido como o tempo necessário para metade da água aprisionada no interior da espuma drenar para o fundo da proveta. Para obtenção do tempo de meia-vida ($t_{1/2v}$), começou-se por definir o valor de metade da massa de espuma presente na proveta. Com o passar do tempo, as bolhas

de espuma rompem-se e o líquido drena para o fundo do recipiente. Quando a porção de líquido na proveta atingiu o volume correspondente a metade da massa da espuma, parou-se o cronómetro e anotou-se o respetivo valor do tempo de meia-vida. Estes ensaios descritos observam-se na Figura 12.



Figura 12: A- medição do peso das amostras de espuma líquida, B- medição do tempo de meia-vida das amostras de espuma líquida (fotografias da autora).

3.2. Análise de propriedades das placas de gesso

É necessário o controlo de qualidade em laboratório das placas BA13 obtidas com as seguintes dimensões: 2000 mm × 1200 mm × 12,5 mm. Este controlo em laboratório é efetuado de forma a analisar as propriedades do produto final com as várias espumas adicionadas ao processo de fabrico. Para o presente relatório são relevantes os seguintes testes de análise das propriedades de placas: humidade, dureza superficial, resistência mecânica à flexão e a capacidade à absorção de água. O procedimento experimental para a execução destes testes às placas de gesso é descrito e ilustrado.

3.2.1. Preparação das amostras

Para a execução dos testes laboratoriais, preparou-se as amostras de duas placas. Cortou-se para cada placa da mesma produção, as amostras nas seguintes dimensões como ilustrado na Figura 13: duas amostras – 300 mm × 300 mm; quatro amostras - 130 mm × 130 mm; quatro amostras- 400 mm (T) × 300 mm (L) e quatro amostras – 400 mm (L) × 300 mm (T).

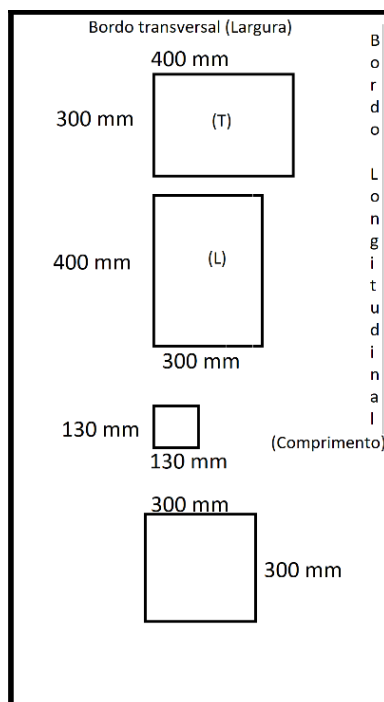


Figura 13-Corte das amostras das placas de gesso com as dimensões indicadas para os testes laboratoriais.

3.2.2. Humidade da placa

A humidade da placa determinou-se em dezasseis pontos situados ao longo de cada placa para verificar se o calor do secador estava a ser suficiente ou teria de ser ajustado. Este ensaio realizou-se com um medidor de humidade, o higrómetro “Testo 6016-1”, como se observa na Figura 14.



Figura 14- Ensaio de medição da humidade da placa de gesso com o higrómetro (fotografia da autora).

Efetuarão-se quatro medições em cada extremo transversal da placa e oito medições no meio do comprimento da placa e registou-se cada valor obtido no aparelho em percentagem. Em seguida, foi calculada a média dos valores de humidade obtidos anteriormente.

3.2.3. Dureza superficial da placa

A dureza superficial da placa indica a dureza da superfície da placa na resistência a impactos. Este teste efetuou-se segundo a norma EN 520 com recurso a uma esfera de aço de 500 g a uma distância de 50 cm desde a superfície inferior da esfera até à superfície da placa. Em cima da placa, colocou-se um papel químico e deixou-se cair a esfera sobre a placa. Retirou-se o papel químico e mediu-se com uma régua o diâmetro da marca pigmentada da esfera sobre a placa. Repetiu-se este ensaio três vezes sobre cada uma das placas e calculou-se a média dos três valores obtidos. O procedimento para este teste é ilustrado na Figura 15.



Figura 15-Ensaio de medição da dureza superficial da placa de gesso: A-antes do lançamento, B- após colidir com a superfície da placa (fotografia da autora).

3.2.4. Resistência mecânica à flexão

A resistência mecânica à flexão corresponde à capacidade que um determinado corpo possui em resistir a esforços aplicados, antes da sua rutura. Esta determinou-se recorrendo à máquina universal de ensaios mecânicos- a ZWICK Z005 e pelo software testXpert II. Para a realização deste ensaio segundo a norma EN 520 cortaram-se as amostras para cada uma das placas, oito amostras retangulares de dimensões $(400 \pm 1,5) \text{ mm} \times (300 \pm 1,5) \text{ mm}$. Quatro das amostras cortaram-se no sentido longitudinal (identificando-se com a letra L) e outras quatro no sentido transversal (identificando-se com a letra T). O corte das amostras deve ser efetuado a uma distância superior a 100 mm dos bordos longitudinais e transversais da placa. Estas amostras foram colocadas na estufa a 41 °C e a vácuo, de forma a conseguir a sua estabilização e obter massa constante, estando assim este procedimento a ser executado segundo as exigências da norma. De seguida, preparou-se a máquina universal dos ensaios mecânicos para ensaios de flexão em 4 pontos e procedeu-se à colocação das amostras no

dispositivo de carga com a face voltada para cima no caso das amostras transversais e com o verso voltado para cima no caso das amostras longitudinais. A barra cilíndrica superior desceu, aplicou-se uma força sobre cada amostra até à rutura, como ilustrado na Figura 16.

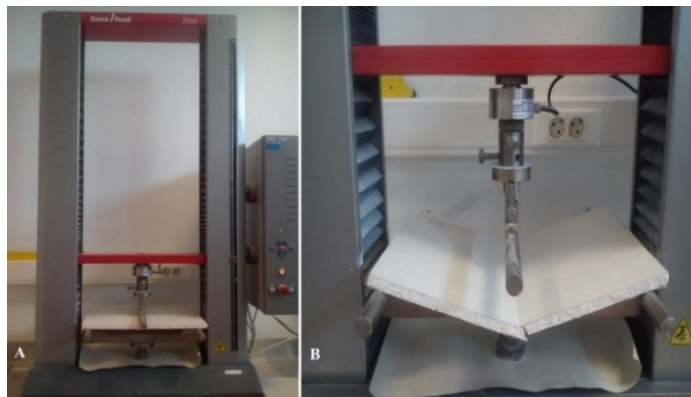


Figura 16- Ensaios de medição da resistência à flexão de amostras de placas de gesso: A- Aplicação da força na placa, B – Rutura da placa (fotografias da autora).

O programa informático gravou as curvas de força-deformação presentes nos anexos A.7, A.8, A.9 e A.10, onde a partir das mesmas foram obtidos os valores de carga de rutura à flexão transversal e longitudinal em Newtons. Por último, obtiveram-se os respetivos valores de carga médios para as quatro amostras transversais e para as quatro amostras longitudinais de cada placa.

3.2.5. Capacidade à absorção de água

Os ensaios de capacidade de absorção de água estão relacionados com a entrada da água na placa através dos poros abertos existentes no gesso endurecido. Para estes ensaios são efetuados dois testes, tais como: o teste da capacidade à absorção de água superficial e o teste da capacidade à absorção de água total.

3.2.5.1. Absorção superficial de água

A capacidade de absorção de água superficial obteve-se recorrendo ao teste de Cobb. Para a realização destes ensaios segundo a norma EN 520 cortou-se para cada placa quatro amostras de dimensões $(130 \pm 1,5)$ mm \times $(130 \pm 1,5)$ mm, duas para ensaiar a face e outras duas para ensaiar o verso. O corte das amostras deve ser efetuado a uma distância superior a 100 mm dos bordos longitudinais e transversais da placa. Pesou-se a massa inicial das amostras (m_i) e colocou-se as amostras no equipamento de Cobb com o lado correto que

deve ser exposto à água. Encheu-se o equipamento com 250 mL água de modo a que a superfície de ensaio da amostra estivesse coberta por 25 mm de água e aguardou-se duas horas como ilustrado na Figura 17.



Figura 17- Ensaios de medição da absorção superficial de água de amostras de placas de gesso (fotografia da autora).

Atingidas as duas horas, eliminou-se o excesso de água com papel secante e pesou-se novamente as amostras (m_f). Foram registados os valores da massa seca e da massa húmida de cada amostra ensaiada para a face e para o verso. O valor da absorção superficial da face e do verso em g/m^2 é determinada através da Equação 6.

$$Abs_{SF|V} = \frac{(m_f - m_i)}{A_{circ}} \quad (\text{Eq.6}).$$

Por fim, obteve-se a média dos valores obtidos nos dois ensaios para a face e a média dos valores obtidos nos dois ensaios para o verso por cada placa.

3.2.5.2. Absorção total de água

O teste da capacidade de absorção total de água realizou-se num tabuleiro simples. Para a realização destes ensaios segundo a norma EN 520 cortou-se para cada placa duas amostras de dimensão $(300 \pm 1,5) \text{ mm} \times (300 \pm 1,5) \text{ mm}$. Estas duas amostras foram cortadas a uma distância superior a 100 mm dos bordos longitudinais. As amostras iniciais (m_i) foram pesadas e mergulhadas horizontalmente dentro do tabuleiro de água, de modo a ficarem completamente submersas de água sem tocarem no fundo do recipiente. Adicionou-se água para que a superfície da amostra estivesse coberta por 25 mm de água e esperou-se duas horas, como visualizado na Figura 18.



Figura 18- Ensaio de medição da absorção total de água de amostras de placas de gesso (fotografia da autora).

Após duas horas, procedeu-se à extração das amostras da água e eliminou-se o excesso de água da superfície e dos bordos da amostra com papel secante. Pesou-se novamente a massa das amostras (m_f). Registou-se os valores da massa seca e da massa húmida de cada amostra e o valor da absorção total de água em percentagem é determinada através da Equação 7.

$$Abs_{tot} = \frac{(m_f - m_i)}{m_i} \times 100 \quad (\text{Eq.7}).$$

Por último, obteve-se o valor médio da capacidade de absorção total das duas amostras.

3.3. Análise da estrutura interna das placas de gesso

No trabalho procedeu-se à obtenção de fotografias da estrutura interna das placas de gesso, por forma a visualizar os vazios criados pela incorporação das diversas espumas no processo de fabrico. Na obtenção das fotografias, recorreu-se ao microscópio fotográfico do modelo Stemi 508 da Zeiss, usando-se para todos os ensaios a ampliação 10×. Este foi disponibilizado pelo Departamento de Química da Universidade de Aveiro e está representado na Figura 19.



Figura 19-Microscópio ótico para obtenção das fotografias da estrutura interna das placas de gesso (fotografia da autora).

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Influência da densidade e do tempo de meia-vida das espumas nas propriedades das placas de gesso

O presente subcapítulo tem o propósito de apresentar, os resultados obtidos no estudo estatístico, bem como a sua discussão. Neste foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos com as várias referências de agentes espumantes na geração de espumas, com o objetivo de investigar a influência de duas características das espumas líquidas nas propriedades do produto acabado.

Nesta secção procuramos identificar se as variáveis medidas experimentalmente (a densidade e o tempo de meia-vida das espumas líquidas) têm um efeito significativo nos valores das propriedades nas placas (na humidade, na dureza, na resistência mecânica à flexão transversal e longitudinal e na capacidade de absorção de água total e superficial). Os valores experimentais obtidos das características das espumas líquidas e das propriedades das placas inseridos no programa de computador Minitab para a realização da análise estatística encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3-Valores médios experimentais obtidos das características de espumas e das propriedades de placas inseridos no software Minitab para realização da análise estatística.

Proporção de agentes espumantes	d_{esp} (g/L)	$t_{(1/2)v}$ (s)	H (%)	Dur (mm)	F_T (N)	F_L (N)	Abs_{tot} (%)	Abs_{SF} (g/m ²)	Abs_{SV} (g/m ²)
GFA02+50 % PFM15	81,75	420,00	0,25	15,83	232,41	537,60	33,77	316,50	2352,50
GFA02+80 % PFM15	77,50	405,00	0,00	16,33	244,60	557,55	32,54	415,50	1029,50
GFA02+50 %CS-230KE	70,50	430,00	0,60	15,83	202,20	483,00	32,59	225,00	214,00
50 % GFA02+ FA-403M	74,00	433,00	0,60	16,33	205,99	475,13	34,65	211,00	2854,50
GFA02+80 % FA-403M	73,50	405,00	0,55	16,33	213,59	498,23	36,58	207,00	905,50
GFA02+50 % GFA03	71,50	436,00	0,50	16,50	191,86	483,00	33,02	233,50	222,50
GFA02+80 % GFA03	70,00	417,00	0,60	17,00	163,77	468,83	35,11	219,00	2392,00
GFA02+50 % GFA01	71,75	435,00	1,70	17,83	191,33	475,13	29,97	299,50	1628,00
Média 100 % GFA02 - PADRÃO	80,63	441,33	0,54	16,29	217,07	564,00	31,10	216,14	440,43

4.1.1. Modelagem estatística da variável resposta, resistência mecânica à flexão transversal

Pretendemos investigar a utilização de um modelo de regressão linear de 1ª ordem para explicar os valores de resistência mecânica à flexão transversal das placas (F_T) em função da densidade da espuma líquida, (d_{esp}), e em função do tempo de meia-vida da espuma, ($t_{1/2v}$). Na Tabela 4, apresentam-se os valores do coeficiente de correlação linear (R) entre as variáveis que mede o grau de relacionamento linear entre as mesmas.

Tabela 4-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis F_T e d_{esp} e F_T e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.

Modelos	R
F_T em função d_{esp}	0,78
F_T em função $t_{(1/2v)}$	-0,36

Da Tabela 4, obtém-se que o valor mais elevado de R é de 0,78 correspondente ao ajuste entre as variáveis F_T e d_{esp} , o que leva a concluir que existe relação linear entre estas duas variáveis e estamos na presença de um bom ajustamento do modelo linear relativo aos dados.

Teste de significância do modelo de regressão:

Na regressão linear é importante testar as hipóteses relativas aos coeficientes de regressão, de forma a perceber se o modelo de regressão linear de 1º ordem de F_T em função d_{esp} é significativo e se a inclusão de uma nova variável, o $t_{(1/2v)}$, afeta o modelo. Para este efeito, as hipóteses a testar para o teste de significância do modelo são:

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$ (hipótese nula) e $H_1: \beta_j \neq 0$ para $j= 1,2$, (hipótese alternativa).

Onde β_1, β_2 são os coeficientes da regressão linear.

O modelo de ajuste de F_T em função da d_{esp} obtido pela rotina da regressão:

$$F_T = -107,02 + 4,043 d_{esp} \quad (\text{Eq.8})$$

Na análise da significância do modelo de regressão F_T em função da d_{esp} utiliza-se a análise de variância (ANOVA) presente na Tabela 5.

Tabela 5- ANOVA para o modelo F_T em função d_{esp} referente à resistência mecânica à flexão transversal.

Fonte de variação	G. L	S. Q	M. Q	F
Regressão (modelo)	1	2502,3	2502,3	10,87
Erro (residual)	7	1611,3	230,2	
Total	8	4113,6		

Onde, G.L corresponde ao número de graus de liberdade, S.Q corresponde à soma dos quadrados, M.Q corresponde à média quadrática e F corresponde à estatística F calculada para a regressão.

Da Tabela 5, obtém-se que $F = 10,87$. Como $F = 10,87 > F_{\text{tab}} = F_{0,05} [1,7] = 5,59$, rejeita-se a hipótese nula, H_0 , para $\alpha = 0,05$. A rejeição de H_0 permite concluir que a variância explicada pelo modelo da Equação 8 é significativamente superior à variância residual. Adicionamos a este modelo a segunda variável, o $t_{(1/2v)}$, de forma a perceber se esta variável afeta significativamente o modelo.

O modelo de ajuste de F_T em função da d_{esp} e do $t_{(1/2v)}$ obtido pela rotina da regressão:

$$F_T = 124,8 + 3,958 d_{esp} - 0,529 t_{\left(\frac{1}{2}\right)v} \quad (\text{Eq.9})$$

Na análise da significância do modelo de regressão F_T em função da d_{esp} e o $t_{(1/2v)}$ utiliza-se a análise de variância (ANOVA) presente na Tabela 6.

Tabela 6-ANOVA para o modelo F_T em função d_{esp} e o $t_{1/2v}$ referente à resistência mecânica à flexão transversal.

Fonte de variação	G. L	S. Q	M.Q	F
Regressão (modelo)	2	2910,6	1455,3	7,26
Erro (residual)	6	1203,0	200,5	
Total	8	4113,6		

A partir das Tabelas 5 e 6, calcula-se o valor de F relativo à adição da variável $t_{1/2v}$ ao modelo de regressão presente na Equação 8, de forma a testar a sua significância. Como $F_{\text{parcial}} = 2,036 < F_{\text{tab}} = F_{0,05} [1,6] = 5,99$, não se rejeita a hipótese nula, H_0 , para $\alpha = 0,05$. A não rejeição de H_0 significa que a adição da variável $t_{1/2v}$ não melhora significativamente o modelo de regressão e pode ser eliminada. O modelo linear mais adequado de 1ª ordem com os termos estatisticamente significativos é o modelo que inclui as variáveis F_T e d_{esp} presente na Equação 8. Assim, conclui-se que a densidade das espumas líquidas tem forte influência na resistência à flexão transversal das placas de gesso pelo modelo de regressão.

4.1.2. Modelagem estatística da variável resposta, resistência mecânica à flexão longitudinal

Pretendemos investigar a utilização de um modelo de regressão linear de 1ª ordem para explicar a resistência mecânica à flexão longitudinal das placas (F_L) em função da densidade da espuma líquida, (d_{esp}), e em função do tempo de meia-vida da espuma, ($t_{1/2v}$). Na Tabela 7, apresentam-se os valores do coeficiente de correlação linear (R) entre as variáveis que mede o grau de relacionamento linear entre as mesmas.

Tabela 7-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis F_L e d_{esp} e F_L e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.

Modelos	R
F_L em função d_{esp}	0,89
F_L em função $t_{(1/2v)}$	-0,12

Da Tabela 7, obtém-se que o valor mais elevado de R é de 0,89 correspondente ao ajuste entre as variáveis F_L e d_{esp} , o que leva a concluir que existe relação linear entre estas duas variáveis e estamos na presença de um bom ajustamento do modelo linear relativo aos dados.

Teste de significância do modelo de regressão:

Na regressão linear é importante testar as hipóteses relativas aos coeficientes de regressão, de forma a perceber se o modelo de regressão linear de 1ª ordem de F_L em função d_{esp} é significativo e se a inclusão de uma nova variável, o $t_{(1/2v)}$, afeta o modelo. Para este efeito, as hipóteses a testar para o teste de significância do modelo são:

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$ (hipótese nula) e $H_1: \beta_j \neq 0$ para $j= 1,2$, (hipótese alternativa).

Onde β_1, β_2 são os coeficientes da regressão linear.

O modelo de ajuste de F_L em função da d_{esp} obtido pela rotina da regressão:

$$F_L = -91,7 + 7,960 d_{esp} \quad (\text{Eq.10})$$

Na análise da significância do modelo de regressão F_L em função da d_{esp} utiliza-se a análise de variância (ANOVA) presente na Tabela 8.

Tabela 8-ANOVA para o modelo F_L em função d_{esp} referente à resistência mecânica à flexão longitudinal.

Fonte de variação	G. L	S. Q	M. Q	F
Regressão (modelo)	1	9053,4	9053,4	25,46
Erro (residual)	7	2488,9	355,6	
Total	8	11542,3		

Onde, G.L corresponde ao número de graus de liberdade, S.Q corresponde à soma dos quadrados, M.Q corresponde à média quadrática e F corresponde à estatística F calculada para a regressão.

Da Tabela 8, obtém-se que $F = 25,46$. Como $F = 25,46 > F_{\text{tab}} = F_{0,05} [1,7] = 5,59$, rejeita-se a hipótese nula, H_0 , para $\alpha = 0,05$. A rejeição de H_0 permite concluir que a variância explicada pelo modelo da Equação 10 é significativamente superior à variância residual. Adicionamos a este modelo uma segunda variável, o $t_{(1/2v)}$, de forma a perceber se esta variável afeta significativamente o modelo.

O modelo de ajuste de F_L em função da d_{esp} e do $t_{(1/2v)}$ obtido pela rotina da regressão:

$$F_L = 5,2 + 7,654 d_{esp} - 0,2219 t_{\left(\frac{1}{2}\right)v} \quad (\text{Eq.11})$$

Na análise da significância do modelo de regressão F_L em função da d_{esp} e o $t_{(1/2v)}$ utiliza-se a análise de variância (ANOVA) presente na Tabela 9.

Tabela 9-ANOVA para o modelo F_L em função d_{esp} e $t_{1/2v}$ referente à resistência mecânica à flexão longitudinal.

Fonte de variação	G. L	S. Q	M.Q	F
Regressão (modelo)	2	9125,4	4562,7	11,33
Erro (residual)	6	2417,0	402,8	
Total	8	11542,3		

A partir das Tabelas 8 e 9, calcula-se o valor de F relativo à adição da variável $t_{1/2v}$ ao modelo de regressão presente na Equação 10, de forma a testar a sua significância. Como $F_{parcial} = 0,178 < F_{tab} = F_{0,05} [1,6] = 5,99$, não se rejeita a hipótese nula, H_0 , para $\alpha = 0,05$. A não rejeição de H_0 significa que a adição da variável $t_{1/2v}$ não melhora significativamente o modelo de regressão e pode ser eliminada. O modelo linear de 1ª ordem mais adequado com os termos estatisticamente significativos é o modelo que inclui as variáveis F_L e d_{esp} presente na Equação 10. Assim, conclui-se que a densidade das espumas líquidas tem forte influência na resistência à flexão longitudinal das placas de gesso pelo modelo de regressão.

4.1.3. Modelagem estatística da variável resposta, absorção total de água

Pretendemos investigar a utilização de um modelo de regressão linear de 1ª ordem para explicar a absorção total de água nas placas (Abs_{tot}) em função da densidade da espuma líquida, (d_{esp}), e do tempo de meia-vida da espuma, ($t_{1/2v}$). Na Tabela 10, apresentam-se os valores do coeficiente de correlação linear (R) entre as variáveis que mede o grau de relacionamento linear entre as mesmas.

Tabela 10-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis Abs_{tot} e d_{esp} e Abs_{tot} e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.

Modelos	R
Abs_{tot} em função d_{esp}	-0,18
Abs_{tot} em função $t_{(1/2v)}$	-0,61

Da Tabela 10, obtém-se que o valor mais elevado de R é de 0,61 correspondente ao ajuste entre as variáveis Abs_{tot} e $t_{(1/2v)}$, o que leva a concluir que existe relação linear entre estas duas variáveis e estamos na presença de um moderado ajustamento do modelo linear relativo aos dados.

Teste de significância do modelo de regressão:

Na regressão linear é importante testar as hipóteses relativas aos coeficientes de regressão, de forma a perceber se o modelo de regressão linear de Abs_{tot} em função $t_{(1/2v)}$ é significativo e se a inclusão de uma nova variável, a d_{esp} , afeta o modelo. Para este efeito, as hipóteses a testar para o teste de significância do modelo são:

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$ (hipótese nula) e $H_1: \beta_j \neq 0$ para $j= 1,2$, (hipótese alternativa).

Onde β_1, β_2 são os coeficientes da regressão linear.

O modelo de ajuste da Abs_{tot} em função $t_{(1/2v)}$ obtido pela rotina da regressão:

$$Abs_{tot} = 72,65 - 0,09280 t_{\left(\frac{1}{2}\right)v} \quad (\text{Eq.12})$$

Na análise da significância do modelo de regressão Abs_{tot} em função do $t_{(1/2v)}$ utiliza-se a análise de variância (ANOVA) presente na Tabela 11.

Tabela 11-ANOVA para o modelo Abs_{tot} em função $t_{(1/2v)}$ referente à absorção total de água.

Fonte de variação	G. L	S. Q	M. Q	F
Regressão (modelo)	1	12,617	12,617	4,12
Erro (residual)	7	21,457	3,065	
Total	8	34,074		

Onde, G.L corresponde ao número de graus de liberdade, S.Q corresponde à soma dos quadrados, M.Q corresponde à média quadrática e F corresponde à estatística F calculada para a regressão.

Da Tabela 11, obtém-se que $F = 4,12$. Como $F = 4,12 < F_{\text{tab}} = F_{0,05} [1,7] = 5,59$, não se rejeita a hipótese nula, H_0 , para $\alpha = 0,05$. A não rejeição de H_0 permite concluir que a variância explicada pelo modelo da Equação 12 não é significativamente superior à variância residual. Por esta razão, o modelo de ajuste em causa não é significativo e não permite explicar a absorção de água das placas. Assim, conclui-se que o tempo de meia-vida e a densidade das espumas líquidas não apresentam influência na absorção total de água nas placas de gesso.

4.1.4. Modelagem estatística da variável resposta, dureza superficial

Pretendemos investigar a utilização de um modelo de regressão linear para explicar a dureza superficial nas placas (Dur) em função da densidade da espuma, (d_{esp}), e do tempo de meia-vida da espuma líquida, ($t_{1/2v}$). Na Tabela 12, apresentam-se os valores do coeficiente de correlação linear (R) entre as variáveis que mede o grau de relacionamento linear entre as mesmas.

Tabela 12-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis Dur e d_{esp} e Dur e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.

Modelos	R
Dur em função d_{esp}	-0,44
Dur em função $t_{1/2v}$	-0,17

Da Tabela 12, obtém-se que ambos os valores de R são baixos, o que leva a concluir que estamos na presença de um mau ajustamento dos modelos lineares relativos aos dados. Ambos os modelos lineares não são significativos, mostrando que a densidade e o tempo de meia-vida das espumas líquidas têm fraca influência na dureza superficial das placas.

4.1.5. Modelagem estatística da variável resposta, humidade

Pretendemos investigar a utilização de um modelo de regressão linear para explicar a humidade das placas (H) em função da densidade da espuma, (d_{esp}), e do tempo de meia-vida da espuma líquida, ($t_{1/2v}$). Na Tabela 13, apresentam-se os valores do coeficiente de correlação linear (R) entre as variáveis que mede o grau de relacionamento linear entre as mesmas.

Tabela 13-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis H e d_{esp} e H e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.

Modelos	R
H em função d_{esp}	-0,45
H em função $t_{(1/2v)}$	-0,48

Da Tabela 13, obtém-se que ambos os valores de R são baixos, o que leva a concluir que estamos na presença de um mau ajustamento dos modelos lineares relativos aos dados. Ambos os modelos lineares não são significativos, mostrando que a densidade e o tempo de meia-vida das espumas líquidas têm fraca influência na humidade das placas.

4.1.6. Modelagem estatística da variável resposta, absorção superficial de água na face

Pretendemos investigar a utilização de um modelo de regressão linear para explicar a absorção superficial de água na face das placas (Abs_{SF}) em função da densidade da espuma, (d_{esp}), e do tempo de meia-vida da espuma líquida, ($t_{1/2v}$). Na Tabela 14, apresentam-se os valores do coeficiente de correlação linear (R) entre as variáveis que mede o grau de relacionamento linear entre as mesmas.

Tabela 14-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis Abs_{SF} e d_{esp} e Abs_{SF} e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.

Modelos	R
Abs_{SF} em função d_{esp}	-0,39
Abs_{SF} em função $t_{(1/2v)}$	-0,42

Da Tabela 14, obtém-se que ambos os valores de R são baixos, o que leva a concluir que estamos na presença de um mau ajustamento dos modelos lineares relativos aos dados. Ambos os modelos lineares não são significativos, mostrando que a densidade e o tempo de meia-vida das espumas líquidas têm fraca influência na absorção superficial de água na face das placas.

4.1.7. Modelação estatística da variável resposta, absorção superficial de água no verso

Pretendemos investigar a utilização de um modelo de regressão linear para explicar a absorção superficial de água no verso das placas (Abs_{sv}) em função da densidade da espuma, (d_{esp}), e do tempo de meia-vida da espuma líquida, ($t_{1/2v}$). Na Tabela 15, apresentam-se os valores do coeficiente de correlação linear (R) entre as variáveis que mede o grau de relacionamento linear entre as mesmas.

Tabela 15-Valores de coeficientes de correlação entre as variáveis Abs_{sv} e d_{esp} e Abs_{sv} e $t_{1/2v}$ no ajuste dos modelos de regressão linear.

Modelos	R
Abs_{sv} em função d_{esp}	-0,07
Abs_{sv} em função $t_{(1/2v)}$	-0,16

Da Tabela 15, obtém-se que ambos os valores de R são baixos, o que leva a concluir que estamos na presença de um mau ajustamento dos modelos lineares relativos aos dados. Ambos os modelos lineares não são significativos, mostrando que a densidade e o tempo de meia-vida das espumas líquidas têm fraca influência na absorção superficial de água no verso das placas.

Para este conjunto específico de agentes espumantes usados na fabricação de espumas, a análise estatística mostra que os modelos lineares de 1º ordem, F_T em função d_{esp} e F_L em função d_{esp} são significativos para os resultados experimentais obtidos. Assim, a densidade das espumas é das únicas características que apresenta influência significativa sobre a resistência mecânica no verso e na face das placas.

4.2. Influência da densidade das espumas na resistência mecânica das placas de gesso

Na presente secção, é discutido para um conjunto alargado de misturas químicas de tensioativos, a influência da densidade das espumas líquidas nos valores de resistência mecânica nas placas de gesso. Este estudo é efetuado com o objetivo de prever o comportamento das espumas com base nos modelos de ajuste obtidos na secção 4.1. Os valores de resistência mecânica à flexão transversal e longitudinal experimentais (F_T Exp e F_L Exp) e os valores de resistência à flexão transversal e longitudinal previstos a partir dos modelos de ajuste das Equações 8 e 10 com base nos valores experimentais da densidade das espumas líquidas (F_T Mod e F_L Mod) encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16-Valores médios de resistência mecânica à flexão transversal e longitudinal experimentais e valores de resistência à flexão transversal e longitudinal previstos.

Proporção de agentes espumantes	F_T Exp (N)	F_L Exp (N)	F_T Mod (N)	F_L Mod (N)
GFA02+50 % PFM15	232,41	537,60	223,50	559,03
GFA02+80 % PFM15	244,60	557,55	206,31	525,20
GFA02+50 % CS-230KE	202,20	483,00	178,01	469,48
50 % GFA02+ FA-403M	198,75	475,13	192,16	497,34
GFA02+ 80 % FA-403M	213,59	498,23	190,14	493,36
GFA02+50 % GFA03	191,86	483,00	182,05	477,44
GFA02+80 % GFA03	163,77	468,83	175,99	465,50
GFA02+50 % GFA01	191,33	475,13	183,07	479,43
100 % GFA02- PADRÃO	217,07	564,00	218,95	550,08
GFA02+1,5 % FA-403M	225,67	547,67	188,12	489,38
GFA02+4,5 % FA-403M	229,17	585,17	192,16	497,34
GFA02+9 % FA-403M	242,75	647,75	200,25	513,26
GFA02+12 % FA-403M	245,00	656,00	204,29	521,22

Na Figura 20, são apresentados os valores de resistência mecânica à flexão transversal experimentais (F_T Exp) em função dos valores de resistência mecânica à flexão transversal previstos (F_T Mod) a partir do modelo de ajuste da Equação 8 para um conjunto alargado de formulações.

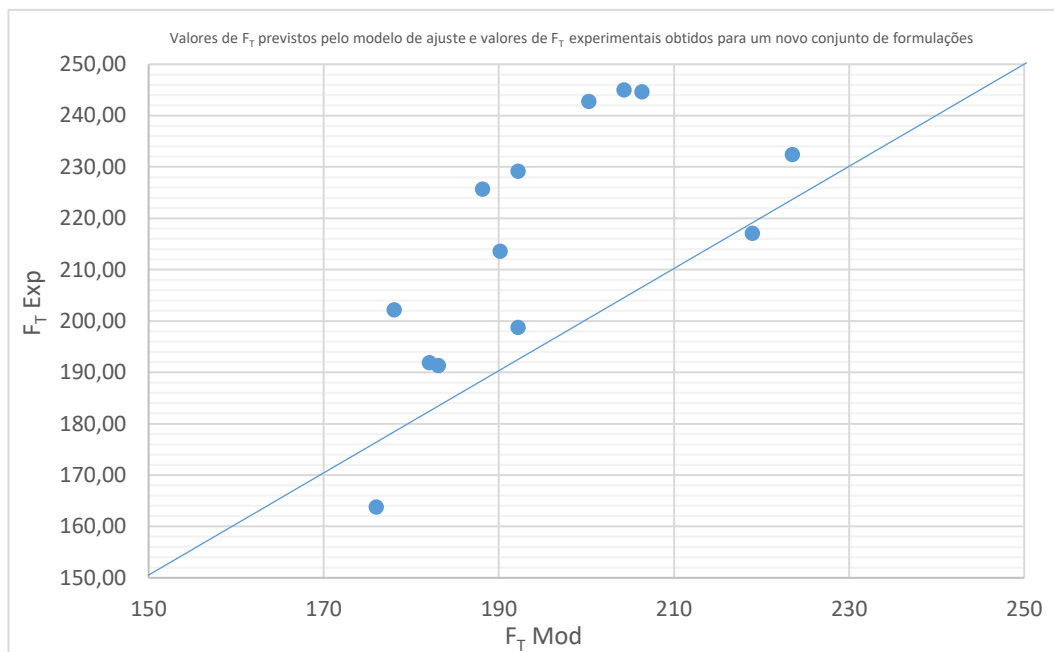


Figura 20-Gráfico dos valores de F_T experimentais em função dos valores de F_T previstos pelo modelo de regressão.

Na Figura 21, são apresentados os valores de resistência mecânica à flexão longitudinal experimentais (F_L Exp) em função dos valores de resistência mecânica à flexão longitudinal previstos (F_L Mod) a partir do modelo de ajuste da Equação 10 para um conjunto alargado de formulações.

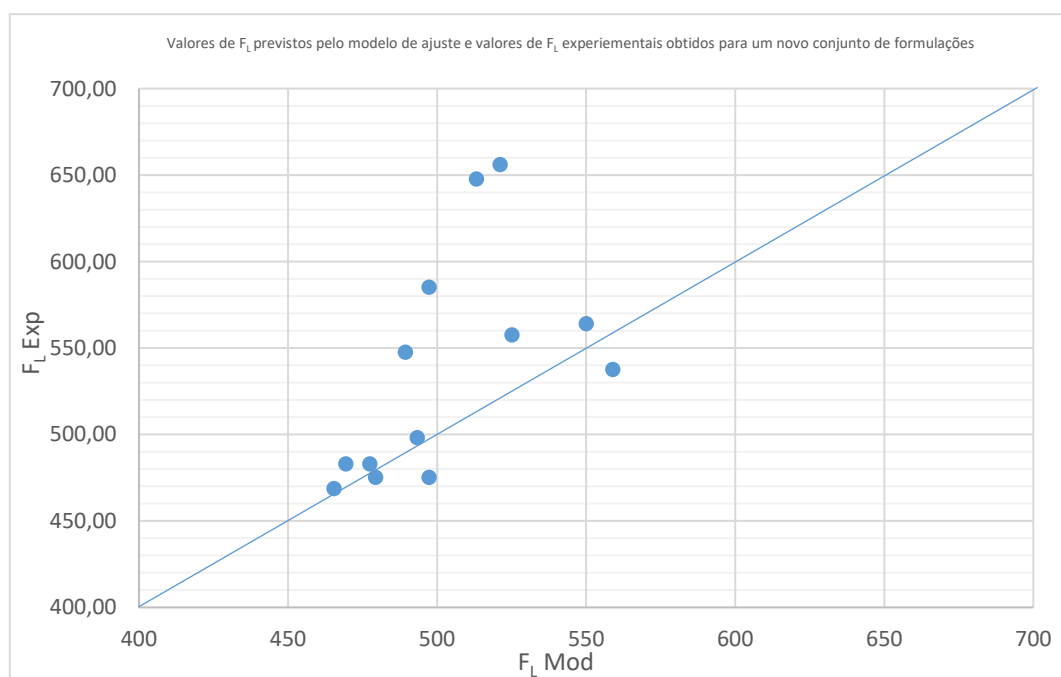


Figura 21-Gráfico dos valores de F_L experimentais em função dos valores de F_L previstos pelo modelo de regressão.

Pela análise das Figuras 20 e 21, é notável que os valores experimentais de resistência mecânica à flexão diferem significativamente dos valores previstos através dos modelos de ajuste de 1ª ordem com base na densidade das espumas líquidas. Acontece que os pontos azuis deveriam estar muito próximos da reta $y = x$ para se considerar que o modelo é um bom ajuste para este conjunto de dados, o que não acontece. Logo, os modelos de ajuste obtidos na secção 4.1 para F_L e F_T não são significativos e válidos para todas as formulações de agentes espumantes deste conjunto.

Observação de casos particulares:

Na Figura 22, são apresentados os valores médios da força de resistência à flexão transversal das placas em função da densidade das espumas líquidas geradas através de um conjunto ampliado de misturas químicas de tensioativos.

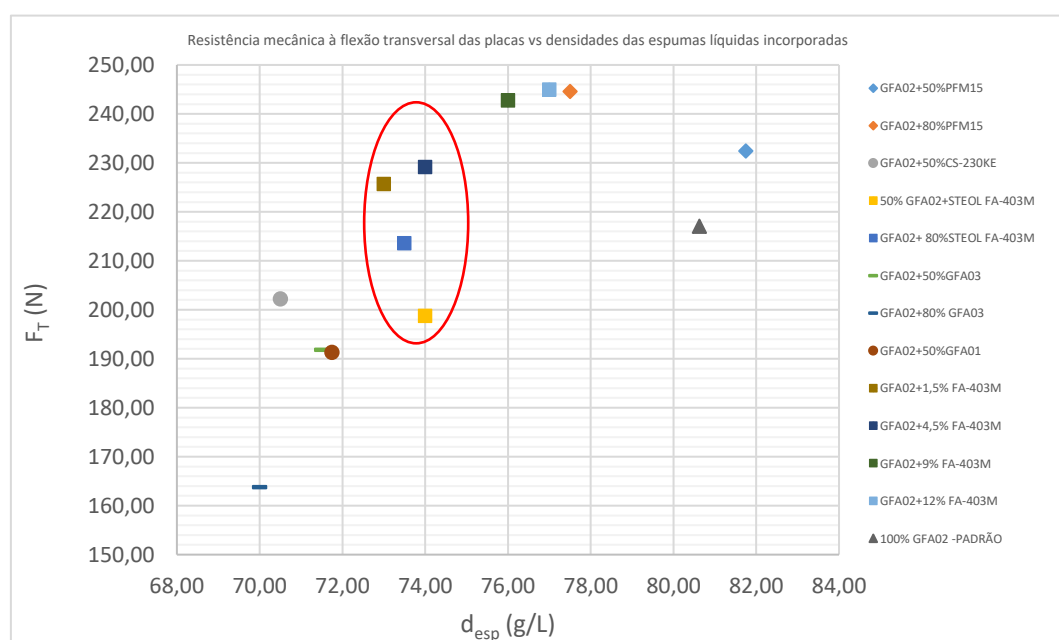


Figura 22- Valores médios da resistência mecânica à flexão transversal das placas em função da densidade das espumas líquidas.

Na Figura 23, são apresentados os valores médios da força de resistência à flexão longitudinal das placas em função da densidade das espumas líquidas geradas a partir de um conjunto ampliado de misturas químicas de tensioativos.

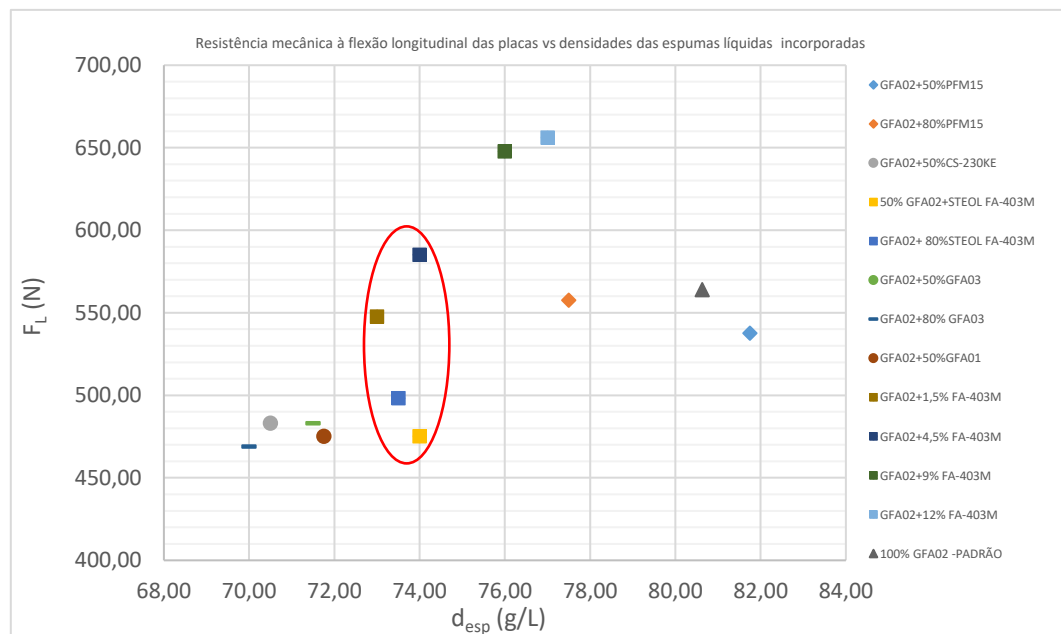


Figura 23-Valores médios da resistência mecânica à flexão longitudinal das placas em função da densidade das espumas líquidas.

Pela análise das Figuras 22 e 23, é visível que as espumas geradas com densidades idênticas em 74 g/L são obtidas pelas misturas de tensioativos seguintes: GFA02+1,5 % FA-403M, GFA02+4,5 % FA-403M, GFA02+80 % FA-403M e 50 % GFA02+FA-403M. Estas quatro misturas são fabricadas pelas mesmas referências de agentes espumantes em diferentes proporções, e originam valores de força de resistência mecânica das placas muito distintos. Estas misturas apresentam para a resistência mecânica à flexão transversal, valores de força compreendidos entre 198,75 N e 229,17 N, sendo observável uma diferença na força aplicada de 30 N entre a referência 50 % GFA02+FA-403M e a GFA02+4,5 % FA-403M para a mesma densidade das espumas, em 74 g/L. Na resistência mecânica à flexão longitudinal, estas misturas apresentam valores de força compreendidos entre 475,13 N e 585,17 N, sendo notável uma diferença muito elevada de 110 N entre a referência 50 % GFA02+FA-403M e a GFA02+4,5 % FA-403M para a mesma densidade das espumas de 74 g/L. Devido a estes casos apresentados, é possível afirmar que a densidade das espumas não tem influência significativa nos valores de resistência estrutural das placas, contrariamente ao previsto na secção 4.1. Estes diferentes valores de resistência obtidos para a mesma densidade das espumas podem estar relacionados com a viscosidade dos líquidos das misturas. Estas viscosidades poderão ser a causa dos diferentes tamanhos das bolhas, uma vez que estas bolhas têm diferentes tempos de coalescência e drenagem do líquido. As bolhas adquirem diferentes tamanhos acabando algumas por se romper, sendo a causa da distinta distribuição de bolhas nas estruturas e dos distintos valores de resistência mecânica.

4.3. Influência das misturas de agentes espumantes na resistência mecânica e na estrutura interna das placas de gesso

Nesta secção é discutido o efeito das espumas obtidas a partir de um conjunto ampliado de misturas de tensioativos, nos valores experimentais de resistência mecânica e na estrutura interna de gesso nas placas. Estas experiências foram efetuadas na expectativa de obter formulações de agentes espumantes que permitam a obtenção de placas mais resistentes. Os valores experimentais obtidos de força de resistência mecânica relativos à flexão transversal e longitudinal em função das várias formulações de tensioativos adicionadas ao gerador encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17-Valores médios experimentais de força de resistência mecânica relativos à flexão transversal e longitudinal em função das várias formulações de tensioativos.

Proporção de agentes espumantes	F_T Exp (N)	F_L Exp (N)
GFA02+50 % PFM15	232,41	537,60
GFA02+80 % PFM15	244,60	557,55
GFA02+50 % CS-230KE	202,20	483,00
50 % GFA02+ FA-403M	198,75	475,13
GFA02+ 80 % FA-403M	213,59	498,23
GFA02+50 % GFA03	191,86	483,00
GFA02+80 % GFA03	163,77	468,83
GFA02+50 % GFA01	191,33	475,13
100 % GFA02- PADRÃO	217,07	564,00
GFA02+1,5 % FA-403M	225,67	547,67
GFA02+4,5 % FA-403M	229,17	585,17
GFA02+9 % FA-403M	242,75	647,75
GFA02+12 % FA-403M	245,00	656,00

4.3.1. Influência das misturas de tensioativos na resistência mecânica das placas de gesso

Na Figura 24, são apresentados os valores médios experimentais da força aplicada relativos à flexão transversal aplicado ao verso das placas com as várias formulações de tensioativos.

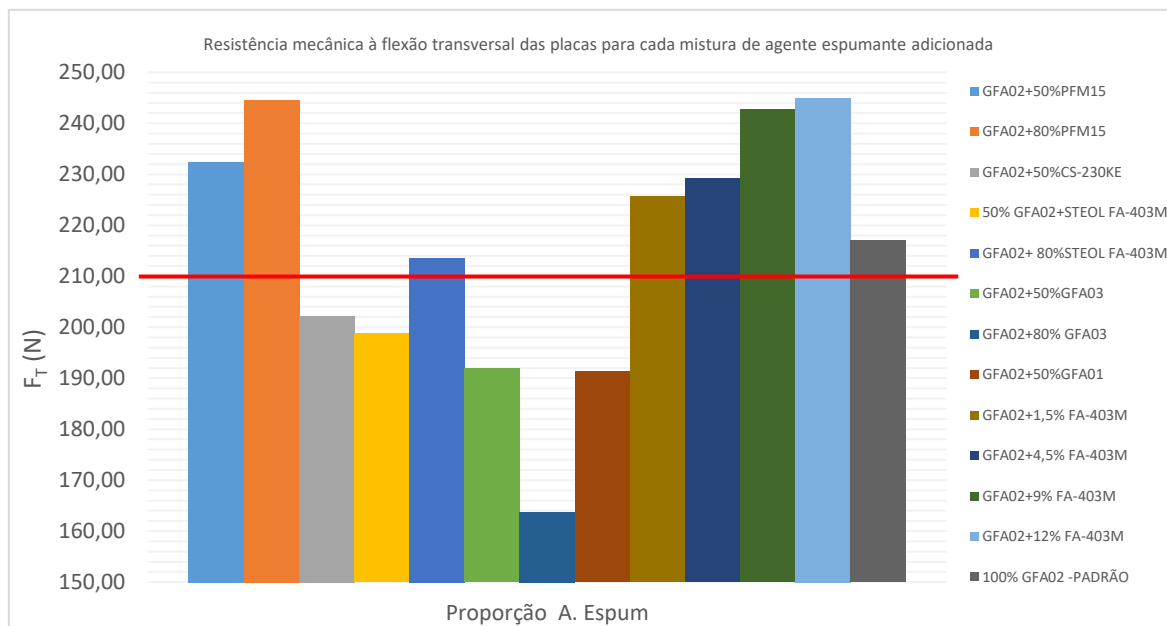


Figura 24-Valores de resistência mecânica à flexão transversal das placas para cada mistura de agente espumante.

Na Figura 25, são apresentados os valores médios experimentais da força aplicada relativos à flexão longitudinal aplicado à face das placas com as várias formulações de tensioativos.

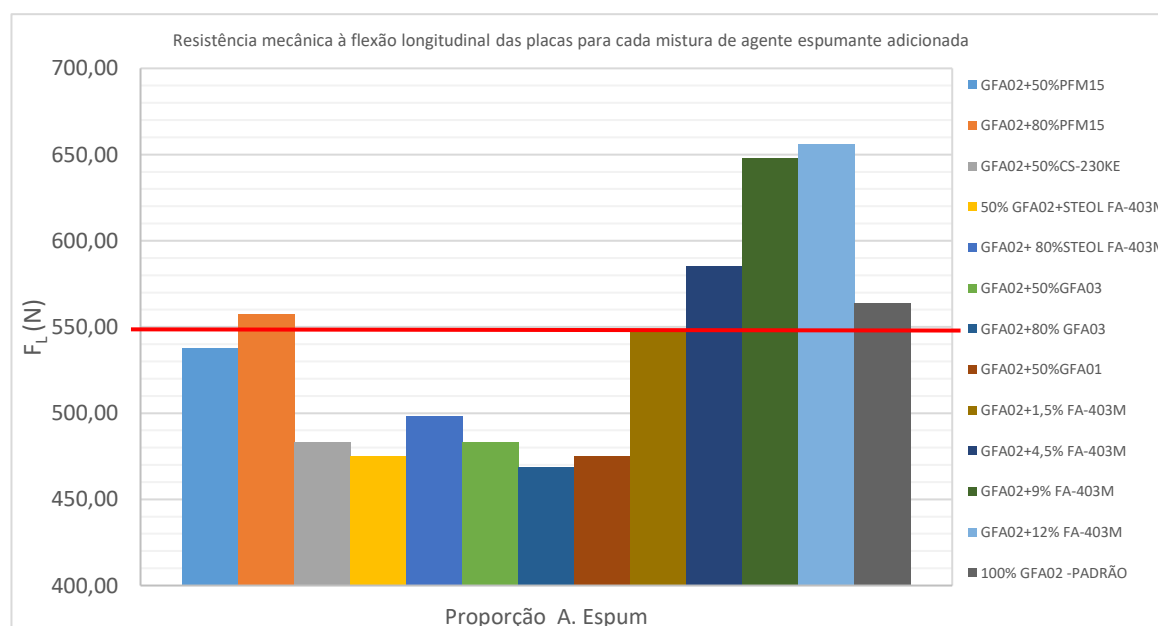


Figura 25-Valores de resistência mecânica à flexão longitudinal das placas para cada mistura de agente espumante.

Pela análise das Figuras 24 e 25, observa-se que a resistência mecânica à flexão transversal e longitudinal das placas é afetada pela mistura química de agente espumante que é adicionada ao gerador na produção de espumas, que são posteriormente misturadas na

pastas de gesso. Como as placas de gesso são utilizadas na construção de divisórias interiores e no revestimento de paredes e tetos, a resistência mecânica à flexão transversal e longitudinal é uma das propriedades que mede a capacidade de rutura do verso e da face respetivamente, quando lhe é aplicada uma força até à rutura. Quanto mais elevadas são estas propriedades, maior resistência apresenta a face e o verso à flexo-tração. Quando colocadas em obras de interiores é a face das placas que está acessível de imediato a colisões acidentais e também é a face que está sujeita a acabamentos (por exemplo, colas, massas e tintas). Por estas razões, os valores de resistência mecânica na face das placas são mais elevados que no verso, pois a gramagem do papel da face é superior à gramagem do papel no verso.

Na análise das representações gráficas, as espumas obtidas pelas misturas GFA02+50 % PFM15, GFA02+80 % GFA03, GFA02+50 % GFA03, GFA02+50 % GFA01, GFA02+50 % CS-230KE, 50 % GFA02+FA-403M, e GFA02+ 80 % FA-403M originam placas de gesso com baixa resistência estrutural. Estas cinco formulações resultam em placas com resistência abaixo dos valores exigidos pela norma EN 520, ou seja, em valores de força abaixo de 210,00 N para a resistência mecânica transversal e valores de força abaixo de 550,00 N para a resistência mecânica longitudinal. Por esta razão, estas formulações são de imediato excluídas para uso no processo de fabrico. As espumas obtidas pelas restantes misturas de tensioativos, nomeadamente: GFA02+80 % PFM15, GFA02+1,5 % FA-403M, GFA02+4,5 % FA-403M, GFA02+9 % FA-403M, GFA02+12 % FA-403M e 100 % GFA02, resultam em placas com resistência estrutural mais elevada. Estas seis formulações resultam em placas com resistência acima do valor mínimo exigido pela norma EN 520, podendo ser usadas no processo de produção.

Da totalidade das referências de tensioativos presentes, a mistura química GFA02+80 % GFA03 é a que gera a espuma que adicionada às placas, origina o valor mais baixo de força de resistência mecânica transversal e longitudinal, em 163,77 N e 475,13 N, respetivamente. E a espuma resultante da mistura de tensioativo GFA02+12 % FA-403M, origina o valor mais elevado de força aplicada na resistência mecânica transversal e longitudinal, em 245,00 N e 656,00 N, respetivamente. Esta mistura GFA02+12 % FA-403M é a que possibilita um melhoramento da resistência estrutural das placas, obtendo-se um aumento de 27,93 N na força aplicada de resistência mecânica à flexão transversal, e de 92,00 N na força aplicada de resistência mecânica à flexão longitudinal, em comparação com os valores obtidos com a espuma padrão 100 % GFA02.

4.3.2. Influência das misturas de tensioativos na estrutura interna das placas de gesso

As espumas obtidas pelas diferentes misturas de referências de tensioativos são combinadas na pasta de gesso, e produzem uma distribuição de vazios no gesso após o seu endurecimento. A Figura 26, apresenta fotografias de uma porção de estrutura interna da placa através do microscópio fotográfico com ampliação 10 ×, onde é visível os poros criados pelas bolhas de ar presentes nas espumas.

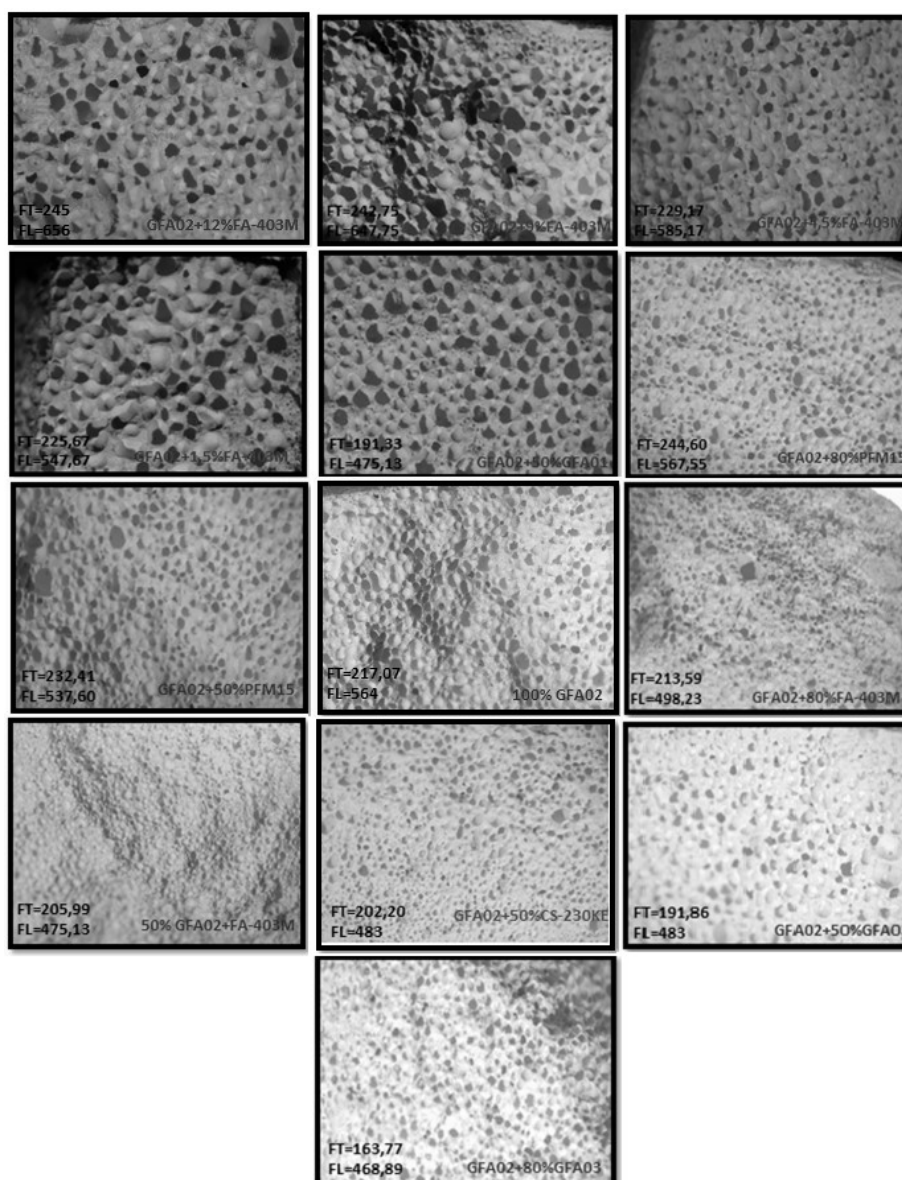


Figura 26-Fotografias das várias estruturas do interior das placas de gesso com as diferentes misturas de agentes espumantes.

Pela análise da Figura 26, observa-se que as espumas geradas pelas diversas misturas químicas de referências de tensoativos que são adicionadas na pasta de gesso afetam a estrutura interna das placas, uma vez que a dimensão e a distribuição dos vazios presentes varia. A dimensão dos poros está relacionada com a capacidade que o agente espumante tem em formar bolhas com uma determinada quantidade de ar no seu interior e a distribuição dos poros está relacionada com a disposição uniforme ou irregular das bolhas de ar quando contactam com a pasta de gesso. Ao longo da placa pode existir zonas onde não é visível a existência de vazios, porque as bolhas rompem-se acabando por serem preenchidas por gesso no seu interior e por sua vez, originam uma organização irregular. Quando estas bolhas não se rompem, ficando relativamente próximas umas das outras, originam uma organização uniforme.

As estruturas obtidas pelas espumas com os agentes espumantes seguintes: GFA02+80 % GFA03, GFA02+50 % GFA03, GFA02+50 % CS-230KE, 50 % GFA02+FA-403M e GFA02+80 % FA-403M, estão representadas na Figura 27.

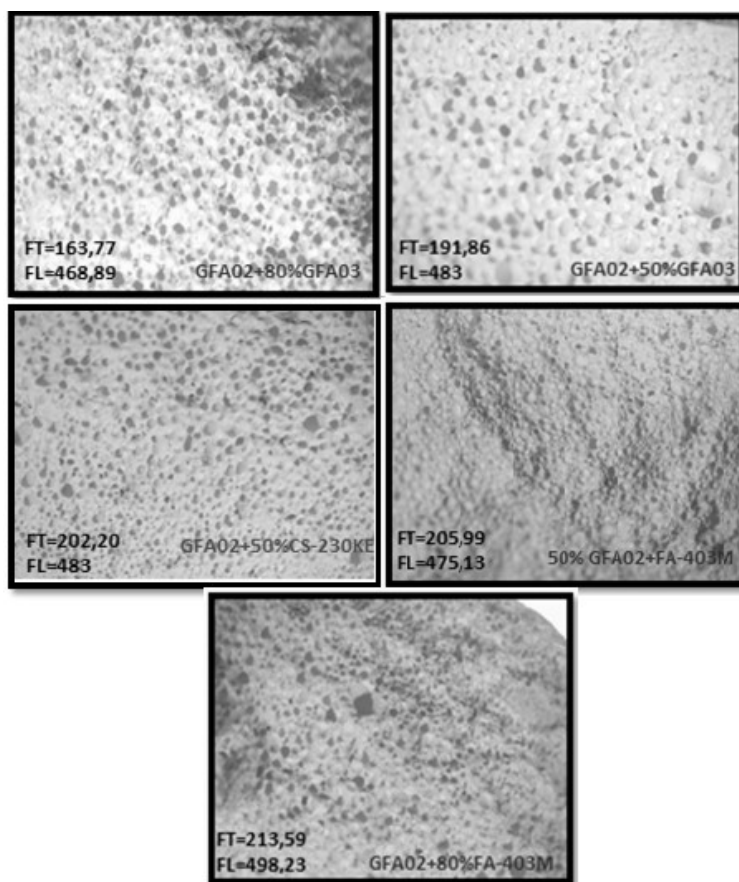


Figura 27-Fotografias das estruturas com as espumas obtidas com os seguintes misturas de tensoativos: GFA02+80 % GFA03; GFA02+50 % GFA03; GFA02+50 % CS-230KE, 50 % GFA02+FA-403M e GFA02+80 % FA-403M.

Estas espumas causam o aparecimento de estruturas com numerosos poros de tamanho reduzido no interior do gesso. Esta gama de estruturas com numerosos vazios origina resistências estruturais mais baixas, sendo-lhe aplicada uma força entre 163,77 N e 213,59 N para a resistência à flexão transversal, e uma força entre 468,89 N e 498,23 N para a resistência à flexão longitudinal. Para os seguintes casos: GFA02+80 % FA-403M, 50% GFA02+FA-403M e GFA02+50 % CS-230 KE, a distribuição dos poros nestas porções de placa é pouco uniforme, existindo muitas zonas visíveis com ausência de porosidade. Para outras espumas fabricadas com GFA02+50 % GFA03 e GFA02+ 80% GFA03, os poros distribuem-se de forma ordenada e não existem zonas com ausência de porosidade ao longo destas porções de placa.

As estruturas obtidas pelas misturas de espumas, 100 % GFA02, GFA02+50 % PFM15 e GFA02+80 % PFM15, estão representadas na Figura 28.

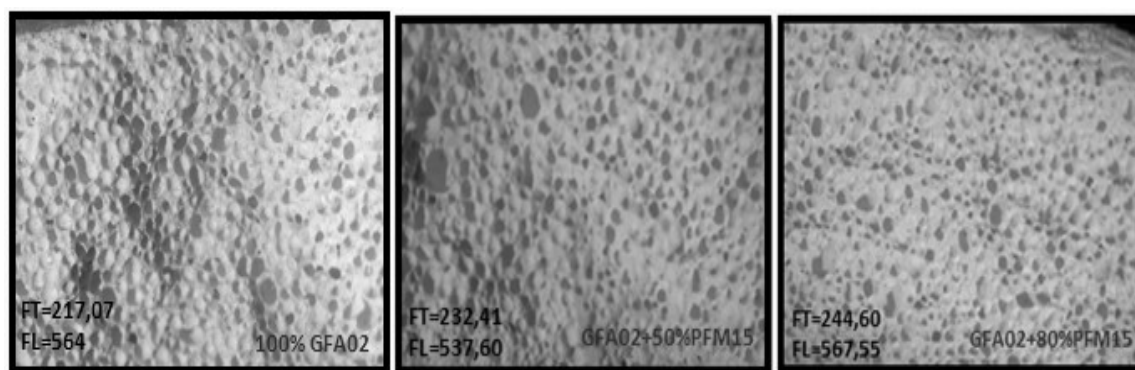


Figura 28-Fotografias das estruturas com as espumas obtidas com os seguintes misturas de tensioativos: 100 % GFA02; GFA02+50 % PFM15 e GFA02+80 % PFM15.

Estas espumas causam o aparecimento de estruturas onde é visível a existência de um misto de poros de dimensão intermédia intercalados com poros de dimensão reduzida. Esta gama de estruturas apresenta placas com resistências estruturais intermédias, sendo-lhe aplicada uma força entre 217,07 N e 244,60 N na resistência à flexão transversal, e uma força entre 537,60 N e 567,55 N na resistência à flexão longitudinal. A espuma fabricada pela mistura GFA02+80 % PFM15 ocasiona o aparecimento de uma estrutura onde os poros estão distribuídos mais regularmente e próximos uns dos outros, relativamente às outras duas estruturas. Por esta razão, esta é das estruturas que exibe um valor de carga aplicada mais elevada em relação às outras duas estruturas. Na estrutura obtida pela incorporação da mistura 100 % GFA02, é visível que os vazios estão distribuídos de forma irregular e encontram-se distantes uns dos outros, existindo várias zonas assinaladas na Figura 29 onde não há porosidade presente. Nestas zonas é notável as marcas do contorno das bolhas de ar,

uma vez que estas bolhas se quebraram durante o crescimento dos cristais de sulfato de cálcio di-hidratado e os vazios ficaram preenchidos pela pasta de gesso.

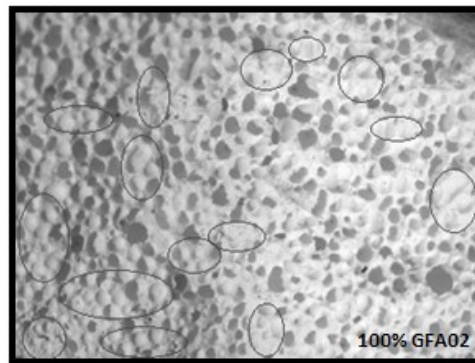


Figura 29-Fotografia da estrutura com a espuma 100 % GFA02 mostrando zonas com ausência de poros e sua distribuição muito irregular.

As estruturas obtidas pelas misturas de espumas, GFA02+12 % FA-403M, GFA02+9 % FA-403M, GFA02+4,5 % FA-403M e GFA02+1,5 % FA-403M, estão representadas na Figura 30.

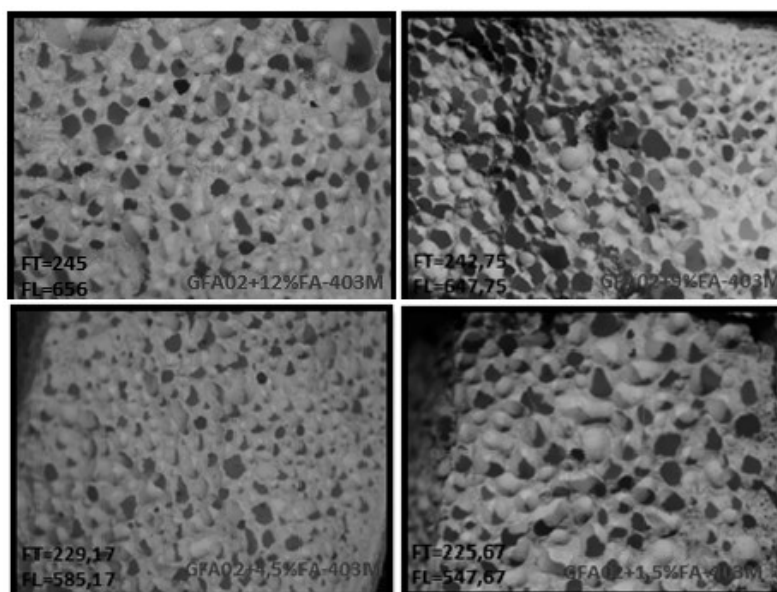


Figura 30-Fotografias das estruturas com as espumas obtidas com os seguintes misturas de tensioativos: GFA02+12 % FA-403M; GFA02+ 9 % FA-403M, GFA02+4,5 % FA-403M e GFA02+1,5 % FA-403M.

Estas espumas causam o aparecimento de estruturas com poros de maior dimensão interligados uns aos outros por paredes espessas de gesso comparativamente com as estruturas da Figura 27 e 28. Esta série de estruturas origina resistências estruturais mais elevadas, sendo necessário aplicar-lhe uma força entre 225,67 N e 245,00 N na resistência à flexão transversal, e uma força entre 547,67 N e 656,00 N na resistência à flexão longitudinal. A estrutura com a espuma GFA02+ 12 % FA-403M é a estrutura mais

favorável, onde é notável a presença de maior fração de vazios, distribuídos de forma organizada e próximos uns dos outros. As estruturas geradas pelas espumas, GFA02+1,5 % FA-403M, GFA02+4,5 % FA-403M, GFA02+9 % FA-403M, ocasionam o aparecimento de menor fração de poros, distribuídos de forma mais irregular e distantes uns dos outros. É observável a presença de marcas superficiais do contorno das bolhas em todas estas estruturas, sendo mais evidente nas estruturas com a incorporação das espumas GFA02+1,5 % FA-403M, GFA02+4,5 % FA-403M e GFA02+9 % FA-403M, estando as zonas assinaladas com círculos na Figura 31, pois as bolhas desapareceram durante o endurecimento da pasta de gesso e os vazios criados ficaram preenchidos por pasta.

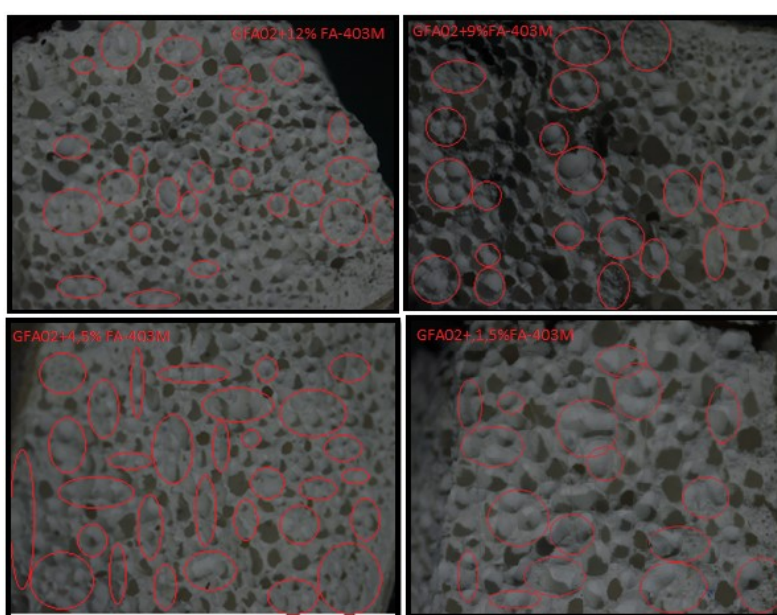


Figura 31-Fotografias das estruturas onde é visível as zonas com ausência de poros.

A estrutura otimizada com a espuma resultante da mistura GFA02+12 % FA-403M e a estrutura com a espuma padrão 100 % GFA02 usada até à data na Gyptec, está representada na Figura 32.

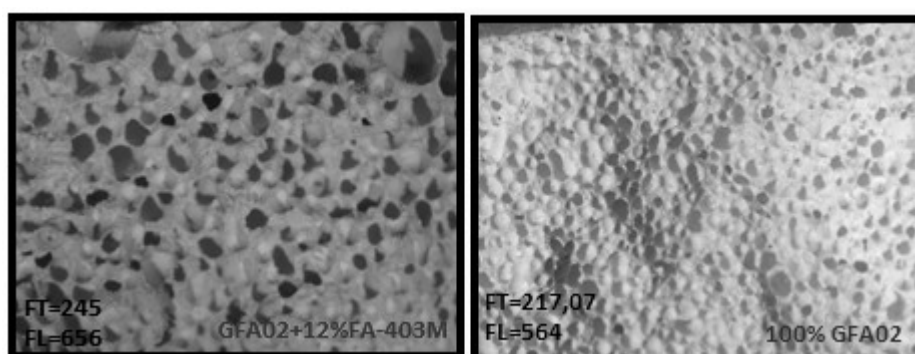


Figura 32-Fotografias das estruturas com as espumas obtidas com os seguintes misturas de tensoativos: GFA02+12 % FA-403M e 100 % GFA02.

A espuma obtida pela mistura GFA02+12 % FA-403M permite o melhoramento da resistência mecânica das placas por introdução de poros de dimensão superior, interligados por paredes densas de gesso, uniformemente organizados e próximos uns dos outros, em comparação com os observados na estrutura obtida pela mistura 100 % GFA02. A estrutura com o tensioativo GFA02+12 % FA-403M permite a obtenção de placas estruturalmente mais resistentes, idênticas às estruturas ordenadas do tipo “favos de mel”, sendo necessário executar mais força por unidade de área para as quebrar. É conseguido com esta espuma um aumento de 27,93 N na força aplicada relativa à flexão do verso da placa e um aumento de 92,00 N na força aplicada relativa à flexão da face da placa em comparação com os valores obtidos com o uso da espuma padrão.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O trabalho desenvolvido nesta dissertação emergiu com a finalidade de investigar a influência das duas características das espumas fabricadas através do uso de vários agentes espumantes nas propriedades das placas de gesso. Também foi realizado para perceber como é que as espumas geradas a partir de um conjunto alargado de tensioativos afetavam os valores de resistência mecânica e a estrutura interna de gesso no interior das placas, com vista à obtenção de placas com maior resistência.

A densidade e o tempo de meia-vida das espumas líquidas não são as variáveis responsáveis pelos valores obtidos nas propriedades das placas estudadas.

A referência de agente espumante que é adicionada na geração de espumas deve ser escolhida e testada. Este tensioativo além de diminuir a tensão superficial da água, é responsável por controlar o tamanho das bolhas de ar presentes. A resistência mecânica das placas é influenciada pela dimensão e pela distribuição das bolhas de ar, verificando-se que o aumento da resistência estrutural das placas é conseguido por incorporação vazios maiores, interconectados uns com os outros por paredes espessas de gesso, dispostos de forma uniforme e relativamente próximos uns em relação aos outros.

O melhoramento das propriedades das placas é obtido na adição da referência de agente espumante GFA02+12 % FA-403M, para a qual se verifica o valor mais elevado de resistência mecânica do produto final. Para esta é obtido um aumento percentual de 12,9 % na força transversal e de 16,3 % na força longitudinal aplicada em comparação com os valores obtidos com a referência padrão empregue até à data na Gyptec.

Como trabalhos futuros, sugere-se a realização de um estudo da influência da viscosidade das espumas no valor das propriedades das placas. Recomenda-se a alteração de parâmetros físicos, o fluxo de ar e de água no gerador na fabricação das espumas, com o objetivo de perceber as mudanças na dimensão e na distribuição dos vazios criados no gesso endurecido pelas bolhas de ar e no valor das suas propriedades. Indica-se o uso de aditivos de reforço combinados com o agente espumante e a água, por exemplo sais de polifosfato solúveis em água, sais polifosfato solúveis em água com amido, ácido bórico, fibras e glicerina, uma vez que estes criam uma casca endurecida em torno da bolha, reforçando-a,

evitando que as bolhas desapareçam no decorrer do crescimento dos cristais de sulfato de cálcio di-hidratado garantindo maior uniformidade da porosidade ao longo da placa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I, Nery. “Yeso Acartonado”. 2015. [Online]. Disponível em:
http://ipiac-nery.com/wp-content/uploads/2016/05/Gesso-cartonado_esp.pdf.
[Consultado a: 15-Março-2017].
- [2] Lafarge. “Gypsum innovation” .[Online]. Disponível em:
http://www.lafarge.com/12072007-Research_Innovation-gypsum_alternative_video-uk.html. [Consultado a: 15-Junho-2017].
- [3] Lafarge. “More About Wallboard Markets.” [Online]. Disponível em:
http://www.lafarge.com/04272007-group-more_about_gypsum_markets-uk.pdf.
[Consultado a: 15-Maio-2017].
- [4] G, Global. “Interactions between admixtures in wallboard production”. 2012.
[Online]. Disponível em: <http://www.globalgypsum.com/magazine/articles/670-interactions-between-admixtures-in-wallboard-production>. [Consultado a: 15-Maio-2017].
- [5] N, Vila-Chã. “Estudo de um Material Compósito à Base de Gesso e Cortiça”.
Universidade do Minho. 2012.
- [6] L, Teixeira. “Reciclagem de Placas de Gesso Cartonado”. Universidade do Minho.
2014.
- [7] A, Camões; C, Cardoso; C, Cunha; S, Vasconcelos; G, Medeiros; P, Eires; R, Jalali;
P, Lourenço. “Caracterização de Materiais Compósitos à base de Gesso FGD”.
Guimarães. 2010.
- [8] A, Carvalho. *Geologia Sedimentar- Volume III- Rochas Sedimentares*. 24ª Edição.
Lisboa. 2006.
- [9] ATEDY. “Manual de ejecución de Revestimientos Con Yeso”. Madrid. 2014.
- [10] L, Bauer. *Materiais de Construção*. LTC Editora. 2001.
- [11] J, Coutinho. “Materiais de Construção 2: 1ª Parte – Ligantes e Caldas”. Porto. 2006.

- [12] Eurogypsum. “Living with Gypsum : From Raw Material to Finished Products”. 2008. [Online]. Disponível em:
<http://www.eurogypsum.org/wpcontent/uploads/2015/04/livingwithgypsum.pdf>.
[Consultado a: 03-Março-2017].
- [13] L, Machado. “Material Compósito- Propriedades do aglomerado de Gesso e Partículas Fragmentadas de Bambu”. ISEP- Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2011.
- [14] J, Deer; W, Howie; R, Zussman. “Minerais Constituintes das Rochas- uma introdução”. 2ª Edição. F, C. Gulbenkian. 2000. pg 628.
- [15] F, Lins; A, Luz. “Rochas & Minerais Industriais- Usos e Especificações”. 1ª Edição. Rio de Janeiro. 2005. pgs. 449–470.
- [16] J, Ávila e Sousa; M, Rocha; D, Carvalho. “Nova placa composta de gesso laminado com isolamento incorporado em aglomerado de cortiça expandida”. Disponível em:
http://www.gypotec.eu/es/documentos/GYPCORK_resumo_tecnico.pdf. [Consultado a: 02-Março-2017].
- [17] M, Alves. “Controlo de Qualidade do Gesso- Produto do Processo de Dessulfuração dos Gases de Combustão na Central Termoelétrica do Pego”. Instituto Politécnico de Tomar. 2013.
- [18] G, Ibérica. “Gesso FGD”. [Online]. Disponível em:
<http://www.gypotec.eu/gessoFGD.php>. [Consultado a: 04-Março-2017].
- [19] F, Torgal; S, Jalali. “Construção sustentável: contributos do gesso para a sustentabilidade da construção”. Guimarães. pgs 44–45. Novembro. 2010.
- [20] S, Lima. “Influência da adição de substâncias orgânicas no tempo de pega do gesso de construção”. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. 2013.
- [21] D, Elko; A, Savoly. “Gypsum Wallboard Chemical Additives”. 2015. [Online]. Disponível em: <http://www.geosc.com/Custom-Solutions/GEO-Dispersant-and-Soap-Additives-for-Wallboard-Ma>. [Consultado a: 01-Abril-2017].

- [22] M, Gomes. “Otimização do tempo e da temperatura no processamento da gipsita oriunda dos cristalizadores da produção de sal para obter gesso de uso na construção civil”. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2012.
- [23] D, Melo. “Processo de calcinação da gipsita/resíduo de um forno rotativo contínuo para a produção de gesso beta reciclável”. Universidade Federal de Pernambuco. 2012.
- [24] S, Lopes. “Conceção e Produção de Placas de Gesso Laminado”. Instituto Politécnico de Tomar. 2012.
- [25] J, Seufert; B, Conner; C, Urban; R, Weir; “Lightweight gypsum wallboard and method of making same”. Patente N° US 2003/0084980A1. 2003.
- [26] G, Ibérica. “Placas de Gesso Laminado”. [Online]. Disponível em: <http://www.gypotec.eu/pgl.php>. [Consultado a: 31-Março-2017].
- [27] K, Birdi. “Handbook of Surface and Colloid Chemistry”. K.S.Birdi, Ed. Copenhagen. Denmark. 1997. pgs. 180–213.
- [28] F, Schramm; L, Wassmuth. "Foams: Basic Principles". *Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry Advances in Chemistry*. A. C. Society. Washington. 1994.
- [29] T, Eren. “Foam Characterization: Bubble size and texture effects”. Middle East Technical University. 2004.
- [30] J, Cortes; F, Fuentes. “Metodologia experimental para la utilizacion de espumas como agentes divergentes”. Universidad Industrial de Santander. 2011.
- [31] K, Sucech; S, Hinshaw; S, Nemeth; B, Buster. “Method for preparing uniformly foamed gypsum product with less foam agitation”. Patente N° 5683635. 1997.
- [32] S, Diez; R, Pidnebesny; J, Ng. “Foaming Agent”. Patente N° 5240639. 1993.
- [33] L, Sucech; S, Villa. “Producing foamed gypsum board using a foaming agent blend”. Patente N° 5643510. 1997.
- [34] H, Jaffel. “Method and apparatus for manufacturing gypsum products”. Patente N° WO2012136760A1. 2012.

- [35] M, Green; H, Weinstein. "Foam Generating compositions". Patente Nº 4676835. 1986.
- [36] G, Ibérica. "Quem Somos." [Online]. Disponível em:
<http://www.gypotec.eu/empresa.php>. [Consultado a: 15-Março-2017].
- [37] G, Ibérica. "Placas de Gesso." [Online]. Disponível em:
<http://www.gypotec.eu/placas.php>. [Consultado a: 31-Março-2017].
- [38] U, Algarve. "Regressão linear Múltipla". [Online]. Disponível em:
http://w3.ualg.pt/~cfsousa/Ensino/Comp_mat/regressão%20linear%20múltipla_07-08_.pdf. [Consultado a:15-Abril-2017].
- [39] N, Silva. " Regressão Linear". Slides de apoio de Métodos Estatísticos. Universidade de Aveiro. 2013/2014.
- [40] P, Gomes; D, Carvalho. "Avanços na estrutura interna das placas de gesso e suas implicações no processo de fabrico e qualidade do produto acabado". [Online]. Disponível em:
http://www.gypotec.eu/documentos/PlacasGypotecNovaEstrutura_MaisVantagens.pdf. [Consultado a: 15-Junho-2017].

ANEXOS

A.1- Resultados da medição das características da espuma padrão líquida, 100 % GFA02

Tabela 18-Resultados obtidos das condições de operação, da medição do peso da espuma líquida, da densidade da espuma líquida e do tempo de meia-vida da espuma líquida com a referência 100 % GFA02 nas condições típicas de operação da fábrica.

N° Amostra	A.Esp 1	A.Esp 2	Razão AG. Esp	Q _{AGEsp1} (g/s)	Q _{AGEsp2} (g/s)	Q _{Ar} (m³/h)	Q _{AguaEsp} (Kg/h)	m _{prov} (g)	V _{prov} (L)	m _{c1} (g)	m _{c2} (g)	m _{c3} (g)	m _{c4} (g)	m _{conj} (g)	m _{esp} (g)	d _{esp} (g/L)	t _{(1/2)v} (s)
2202171022	GFA02	-	100 % GFA02	1,87	0,00	15,50	1150,00	177,00	1,00	265,00	261,00	256,00	256,00	259,50	82,50	82,50	440,00
0 803170735	GFA02	-	100 % GFA02	1,90	0,00	15,50	1150,00	177,00	1,00	265,00	261,00	256,00	256,00	259,50	82,50	82,50	440,00
0 903170132	GFA02	-	100 % GFA02	1,97	0,00	15,50	1150,00	177,00	1,00	265,00	261,00	256,00	256,00	259,50	82,50	82,50	440,00
1002171326	GFA02	-	100 % GFA02	1,70	0,00	15,50	1150,00	177,00	1,00	265,00	261,00	256,00	256,00	259,50	82,50	82,50	440,00
0 702172041	GFA02	-	100 % GFA02	1,74	0,00	15,50	1150,00	177,00	1,00	265,00	261,00	256,00	256,00	259,50	82,50	82,50	440,00
2305171019	GFA02	-	100 % GFA02	1,90	0,00	15,50	1150,00	177,00	1,00	247,00	247,00	250,00	249,00	248,25	71,25	71,25	448,00

A.2- Resultados da medição das propriedades das placas com a incorporação da espuma padrão líquida, 100 % GFA02

Tabela 19-Resultados obtidos na medição da humidade das placas com a referência 100 % GFA02 para as cinco amostras recolhidas nas condições típicas de operação da fábrica.

NºAmostra	H1 (%)	H2 (%)	H3 (%)	H4 (%)	H5 (%)	H6 (%)	H7 (%)	H8 (%)	H9 (%)	H10 (%)	H11 (%)	H12 (%)	H13 (%)	H14 (%)	H15 (%)	H16 (%)
2202171022	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,50	0,60
0 803170735	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,60	0,60
0 903170132	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,60	0,60
1002171326	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,50	0,60
0 702172041	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,50	0,60

Tabela 20-Resultados obtidos na medição da humidade das placas com a referência 100 % GFA02 para amostra nº 2305171019 nas condições típicas de operação da fábrica.

Nº Amostra	H1 (%)	H2 (%)	H3 (%)	H4 (%)	H5 (%)	H6 (%)	H7 (%)	H8 (%)	H9 (%)	H10 (%)	H11 (%)	H12 (%)	H13 (%)	H14 (%)	H15 (%)	H16 (%)	H17 (%)	H18 (%)	H19 (%)	H20 (%)	H21 (%)	H22 (%)	H23 (%)	H24 (%)	H25 (%)	H26 (%)	H27 (%)	H28 (%)	H29 (%)	H30 (%)	H31 (%)	H32 (%)
2305171019	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,50	0,60	0,60	0,60	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,50	0,60	0,70	0,60	0,50	0,50	0,60	0,50

Otimização de propriedades das placas de gesso por manipulação de espumas

Tabela 21-Resultados obtidos na medição da dureza, da resistência mecânica à flexão transversal, da resistência mecânica à flexão longitudinal, da absorção total de água, da absorção superficial de água na face e no verso das placas com a referência 100 % GFA02 para as cinco amostras recolhidas nas condições típicas de operação da fábrica.

N° Amostra	Dur1 (mm)	Dur2 (mm)	Dur3 (mm)	F _{T1} (N)	F _{T2} (N)	F _{L1} (N)	F _{L2} (N)	Abs _{tot1} (%)	Abs _{sf1} (g/m ²)	Abs _{sv1} (g/m ²)
2202171022	16,00	16,00	17,00	189,74	189,74	547,05	539,70	30,56	207,00	245,00
0 803170735	17,00	16,00	17,00	232,14	235,32	622,65	620,55	30,97	207,00	359,00
0 903170132	16,00	15,00	17,00	203,52	216,24	580,65	585,90	30,76	207,00	421,00
1002171326	16,00	16,00	17,00	216,24	202,46	582,75	595,35	29,84	207,00	239,00
0 702172041	16,00	16,00	17,00	233,20	240,62	589,05	623,70	30,87	207,00	294,00

Tabela 22-Resultados obtidos na medição da dureza, da resistência mecânica à flexão transversal, da resistência mecânica à flexão longitudinal, da absorção total de água, da absorção superficial de água na face e no verso das placas com a referência 100% GFA02 para a amostra 2305171019 nas condições típicas de operação da fábrica.

N° Amostra	Dur1 (mm)	Dur2 (mm)	Dur3 (mm)	Dur4 (mm)	Dur5 (mm)	Dur6 (mm)	F _{T1} (N)	F _{T2} (N)	F _{T3} (N)	F _{T4} (N)	F _{L1} (N)	F _{L2} (N)	F _{L3} (N)	F _{L4} (N)	Abs _{tot1} (%)	Abs _{tot2} (%)	Abs _{sf1} (g/m ²)	Abs _{sf2} (g/m ²)	Abs _{sv1} (g/m ²)	Abs _{sv2} (g/m ²)
2305171 019	15,00	16,00	16,00	17,00	17,00	16,00	232,14	228,96	198,22	220,48	501,90	515,55	486,15	505,05	32,10	32,58	235,00	243,00	1224,00	301,00

A.3- Resultados da medição das características das espumas líquidas por mistura de referências de agentes espumantes à referência padrão, 100 % GFA02 em diferentes proporções

Tabela 23-Resultados obtidos das condições de operação, da medição do peso das espumas líquidas, da densidade das espumas líquidas e do tempo de meia-vida das espumas líquidas por misturas de novas referências à referência padrão em diferentes proporções nas condições típicas de operação da fábrica.

N° Amostra	A.Esp 1	A.Esp 2	Razão A. Esp	Q _{AGEsp1} (g/s)	Q _{AGEsp2} (g/s)	Q _{Ar} (m³/h)	Q _{AguaEsp} (kg/h)	m _{prov} (g)	V _{prov} (L)	m _{c1} (g)	m _{c2} (g)	m _{c3} (g)	m _{c4} (g)	m _{conj} (g)	m _{esp} (g)	d _{esp} (g/L)	t _{(1/2)v} (s)
2604171216	GFA02	PFM15	GFA02+ 50 % PFM15	1,65	0,82	15,50	1150,00	177,00	1,00	259,00	261,00	257,00	258,00	258,75	81,75	81,75	420,00
2604171231	GFA02	PFM15	GFA02+ 80 % PFM15	1,40	1,12	15,50	1150,00	177,00	1,00	252,00	254,00	256,00	256,00	254,50	77,50	77,50	405,00
2305171043	GFA02	CS- 230KE	GFA02+ 50% CS-230KE	1,60	0,80	15,50	1150,00	177,00	1,00	248,00	247,00	248,00	247,00	247,50	70,50	70,50	430,00
2305171115	GFA02	FA- 403M	50 % GFA02+ FA-403M	0,70	1,40	15,50	1150,00	177,00	1,00	256,00	249,00	251,00	248,00	251,00	74,00	74,00	433,00
2305171116	GFA02	FA- 403M	GFA02+ 80 % FA-403M	1,30	1,04	15,50	1150,00	177,00	1,00	250,00	249,00	252,00	251,00	250,50	73,50	73,50	405,00
2305171137	GFA02	GFA03	GFA02+ 50 % GFA03	1,42	0,71	15,50	1150,00	177,00	1,00	246,00	249,00	251,00	248,00	248,50	71,50	71,50	436,00
2305171200	GFA02	GFA03	GFA02+ 80 % GFA03	1,10	0,88	15,50	1150,00	177,00	1,00	245,00	246,00	248,00	249,00	247,00	70,00	70,00	417,00
2305171218	GFA02	GFA01	GFA02+ 50 % GFA01	1,65	0,82	15,50	1150,00	177,00	1,00	247,00	249,00	250,00	249,00	248,75	71,75	71,75	435,00

A.4- Resultados da medição das propriedades das placas por mistura de novas referências de agentes espumantes à referência padrão, 100 % GFA02 em diferentes proporções

Tabela 24-Resultados obtidos na medição da humidade das placas com as variadas formulações obtidas por mistura de novas referências de agentes espumantes à referência padrão em diferentes proporções nas conduções típicas de operação da fábrica.

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32
N°	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
260417 1216	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
260417 1231	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
230517 1043	0,60	0,50	0,50	0,50	0,60	0,70	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,50	0,50	0,50	0,60
230517 1115	0,50	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,50	0,50	0,60	0,50
230517 1116	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,50	0,50
230517 1137	0,50	0,60	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,50	0,60	0,70	0,60	0,50	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,70	0,70	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50
230517 1200	0,70	0,90	0,60	0,50	0,60	0,70	0,70	0,70	0,80	0,90	0,70	0,60	0,70	0,60	0,60	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,70	0,70	0,60	0,70	0,70	0,60	0,60	0,60	0,70	0,60	0,60
230517 1218	1,80	2,10	1,80	1,00	2,30	2,00	1,60	1,10	2,30	2,60	1,60	0,90	0,90	1,00	0,80	0,70	0,90	1,50	1,80	1,40	0,90	2,00	1,80	2,00	1,10	1,20	2,10	1,90	1,40	2,20	2,10	2,40

Otimização das propriedades de placas de gesso por manipulação de espumas

Tabela 25-Resultados obtidos na medição da dureza, da resistência à flexão transversal, da resistência à flexão longitudinal, da absorção total e superficial de água nas placas no verso e na face com as variadas formulações obtidas por mistura de novas referências de agentes espumantes à referência padrão em diferentes proporções nas condições típicas de operação da fábrica.

Nº Amostra	Dur1 (mm)	Dur2 (mm)	Dur3 (mm)	Dur4 (mm)	Dur5 (mm)	Dur6 (mm)	F _{T1} (N)	F _{T2} (N)	F _{T3} (N)	F _{T4} (N)	F _{L1} (N)	F _{L2} (N)	F _{L3} (N)	F _{L4} (N)	Abs _{tot1} (%)	Abs _{tot2} (%)	Abs _{sf1} (g/m²)	Abs _{sf2} (g/m²)	Abs _{sv1} (g/m²)	Abs _{sv2} (g/m²)
2604171216	17,00	16,00	15,00	14,00	17,00	16,00	260,76	251,22	207,76	209,88	533,40	540,75	537,60	536,55	34,60	32,95	318,00	315,00	1342,00	3363,00
2604171231	17,00	15,00	17,00	17,00	15,00	17,00	262,88	259,70	232,14	223,66	539,70	564,90	567,00	550,20	32,76	32,33	542,00	289,00	282,00	1777,00
2305171043	15,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	220,48	186,56	187,62	214,12	459,90	462,00	512,40	504,00	31,11	34,07	222,00	228,00	212,00	216,00
2305171115	16,00	15,00	16,00	17,00	17,00	17,00	182,32	225,78	177,02	209,88	466,20	494,55	470,40	479,85	34,61	34,69	203,00	219,00	2507,00	3202,00
2305171116	15,00	16,00	16,00	17,00	17,00	17,00	220,48	218,36	200,34	215,18	495,60	493,50	500,85	522,90	34,77	38,39	207,00	207,00	700,00	1111,00
2305171137	16,00	16,00	16,00	17,00	17,00	17,00	200,34	181,26	182,32	203,52	479,85	491,40	473,55	486,15	32,93	33,11	262,00	205,00	227,00	218,00
2305171200	17,00	17,00	16,00	17,00	17,00	18,00	153,70	167,48	178,08	155,82	470,40	467,25	463,05	471,45	34,46	35,76	218,00	220,00	734,00	4050,00
2305171218	18,00	17,00	18,00	17,00	19,00	18,00	168,54	188,68	218,36	189,74	463,05	472,50	484,05	477,75	25,28	34,66	281,00	318,00	2992,00	264,00

A.5- Resultados da medição da densidade das espumas líquidas por mistura de novas referências de agentes espumantes à referência padrão, 100 % GFA02 em diferentes proporções

Tabela 26-Resultados obtidos das condições de operação, da densidade das espumas líquidas e do tempo de meia-vida das espumas líquidas por mistura de novas referências à referência padrão em diferentes proporções nas condições típicas de operação da fábrica

Nº Amostra	A.Esp 1	A.Esp 2	Razão AG. Esp	Q _{AGEsp1} (g/s)	Q _{AGEsp2} (g/s)	Q _{Ar} (m³/h)	Q _{AguaEsp} (kg/h)	m _{prov} (g)	V _{prov} (L)	m _{c1} (g)	d _{esp} (g/L)	d _{esp} (g/L)
1309171502	GFA02	FA-403M	GFA02+1,5 % FA-403M	2,02	0,03	15,50	1150,00	177,00	1,00	73,00	73,00	73,00
1309171609	GFA02	FA-403M	GFA02+4,5 % FA-403M	2,02	0,09	15,50	1150,00	177,00	1,00	74,00	74,00	74,00
1409171025	GFA02	FA-403M	GFA02+9 % FA-403M	1,94	0,17	15,50	1150,00	177,00	1,00	76,00	76,00	76,00
1409171127	GFA02	FA-403M	GFA02+12 % FA-403M	1,94	0,23	15,50	1150,00	177,00	1,00	77,00	77,00	77,00

A.6. Resultados da medição da resistência mecânica das placas por mistura de novas referências de agentes espumantes à referência padrão, 100 % GFA02 em diferentes proporções

Tabela 27-Resultados obtidos na medição da resistência à flexão transversal e da resistência à flexão longitudinal com as variadas formulações obtidas por mistura de novas referências

Nº Amostra	F _{T1} (N)	F _{T2} (N)	F _{T3} (N)	F _{T4} (N)	F _{T5} (N)	F _{T6} (N)	F _{L1} (N)	F _{L2} (N)	F _{L3} (N)	F _{L4} (N)	F _{L5} (N)	F _{L6} (N)
1309171502	237,00	247,00	225,00	225,00	217,00	203,00	589,00	558,00	559,00	502,00	517,00	561,00
1309171609	230,00	229,00	225,00	233,00	228,00	230,00	582,00	572,00	616,00	581,00	575,00	585,00
1409171025	247,00	253,00	232,00	239,00			650,00	666,00	645,00	630,00		
1409171127	247,00	249,00	238,00	246,00			654,00	667,00	635,00	668,00		

A.7. Gráfico típico da força-deformação para as amostras das seguintes produções: 2305171019; 2305171043; 2305171115; 2305171116; 2305171137; 2305171200; 2305171218

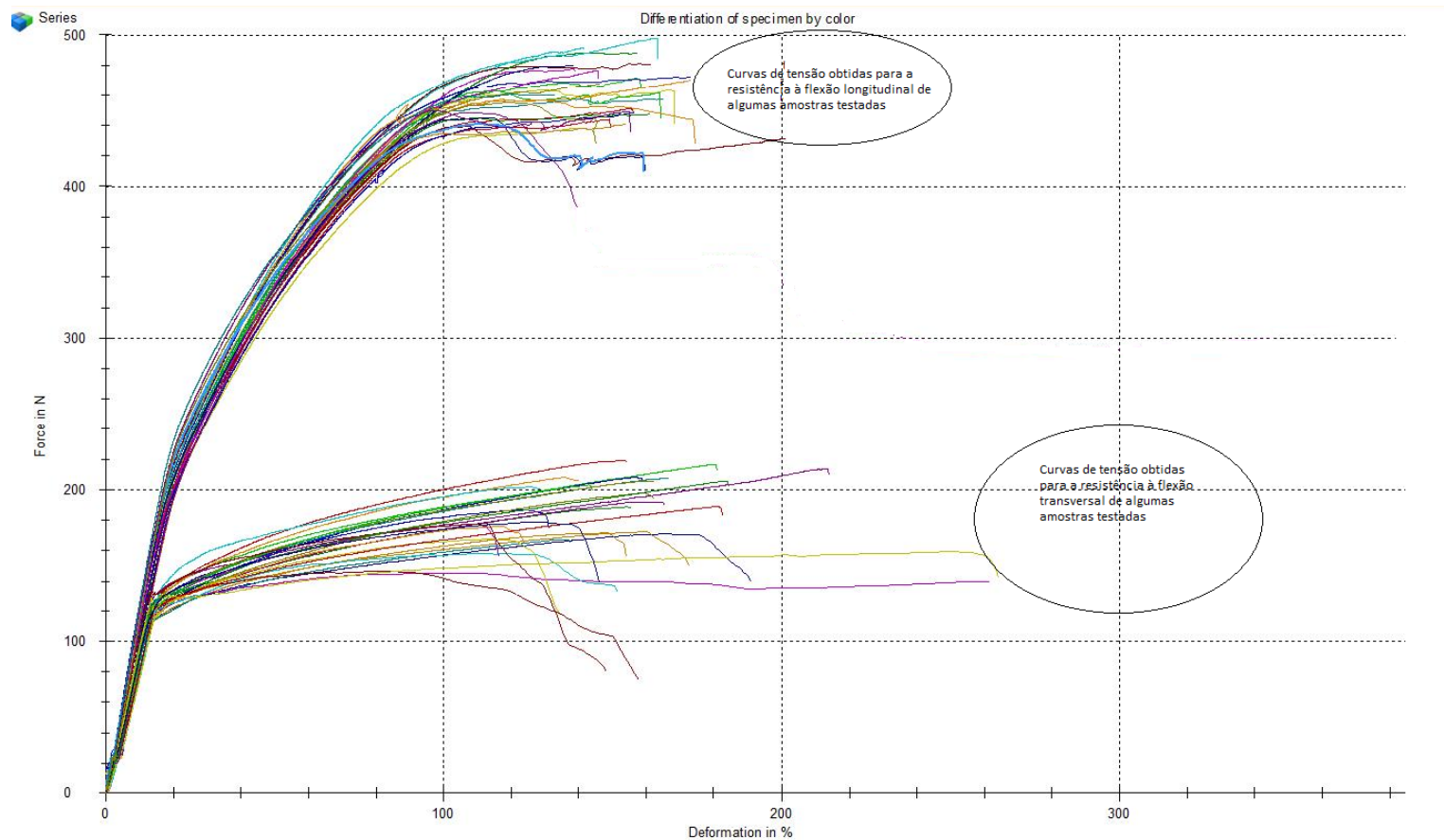


Figura 33- Gráfico típico da força exercida na rutura da placa na face (longitudinal) e no verso (transversal), de onde foram obtidos os valores de força máxima para um conjunto de amostras.

A.8. Gráfico típico da força-deformação para as amostras das seguintes produções: 2202171022; 0803170735; 0903171032; 0702172041; 1002171326.

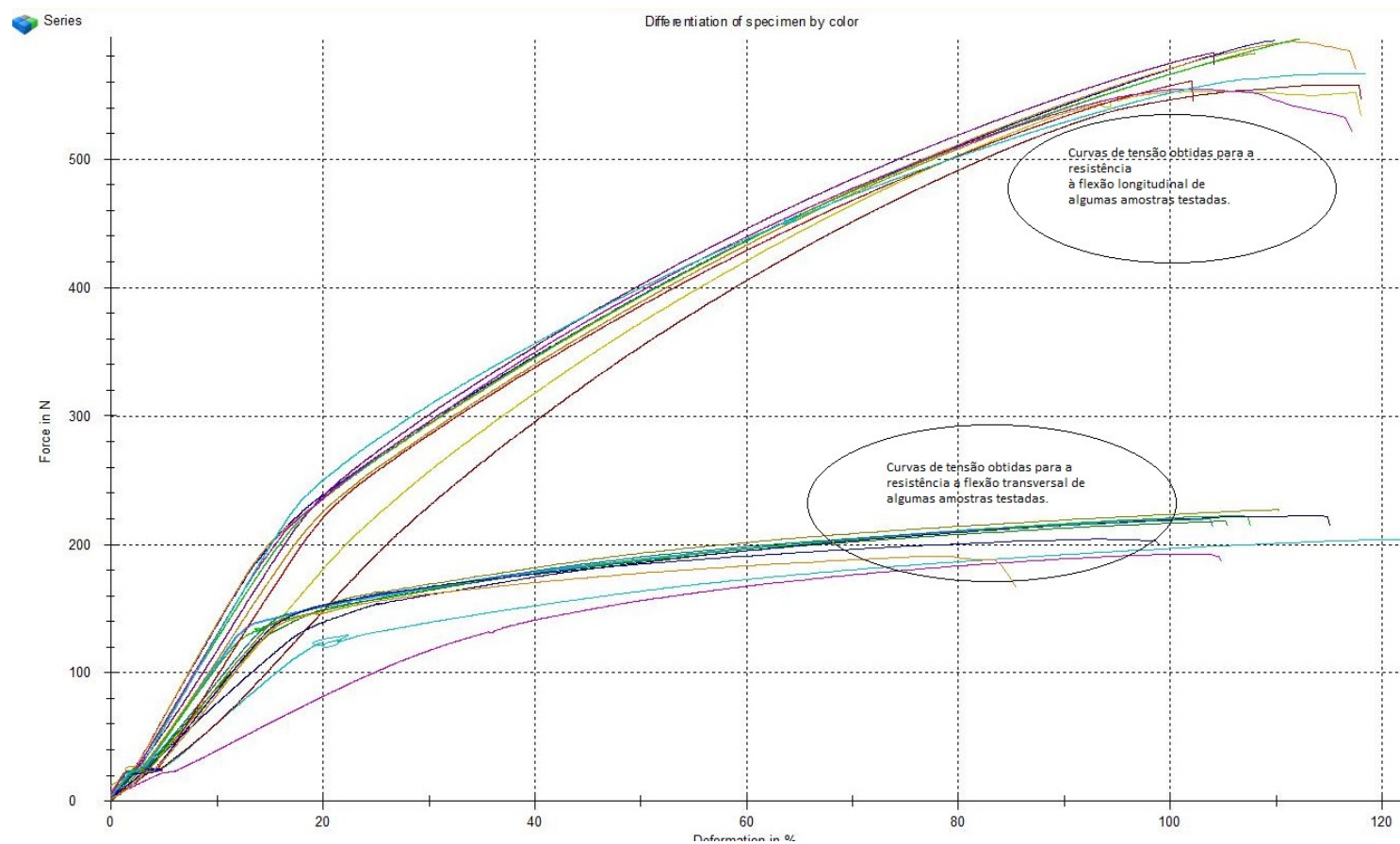


Figura 34-Gráfico típico da força exercida na rutura da placa na face (longitudinal) e no verso (transversal), de onde foram obtidos os valores de força máxima para um conjunto de amostras.

A.9. Gráfico típico da força-deformação para as amostras das seguintes produções: 2604171216;2604171231.

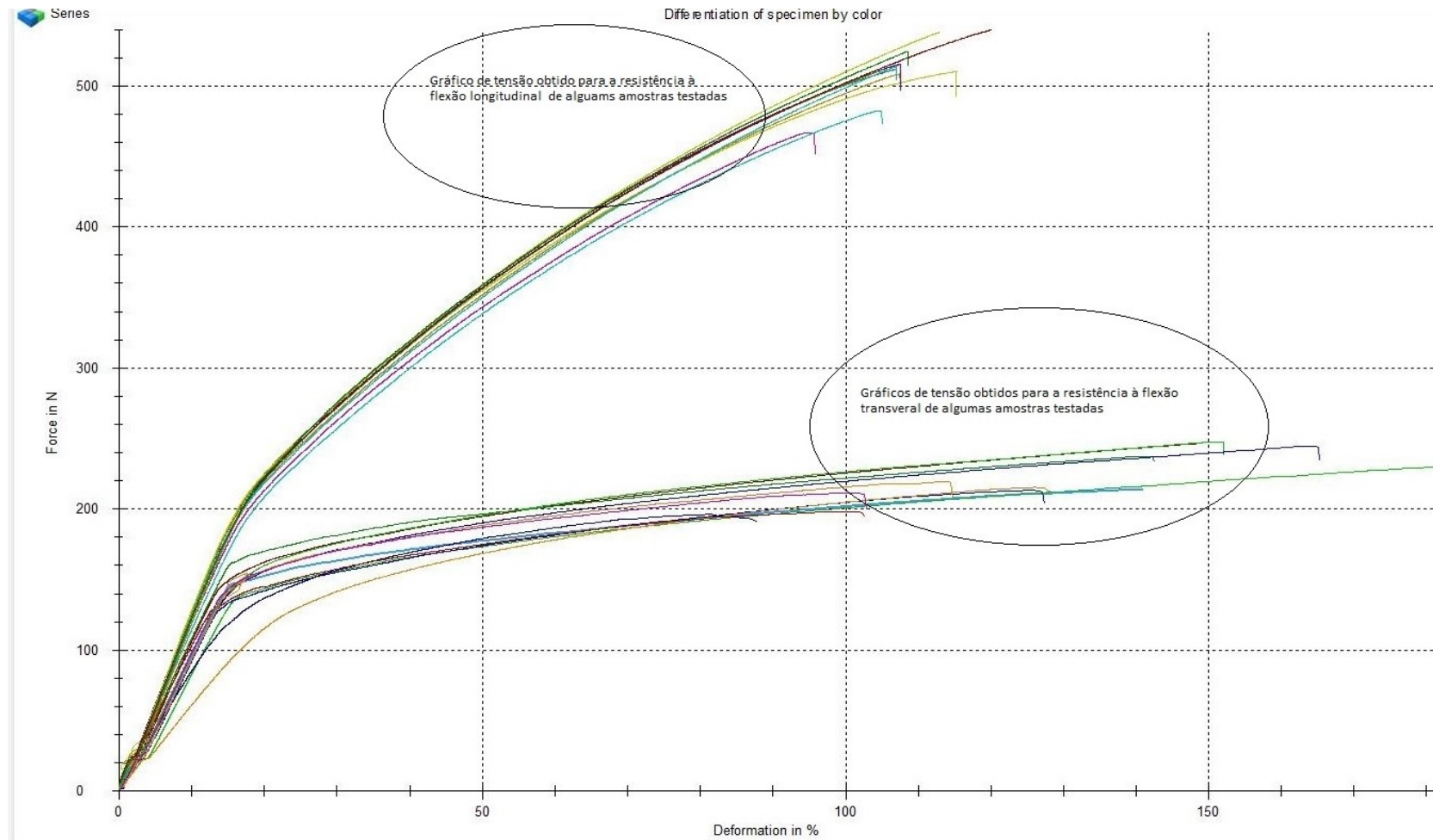


Figura 35- Gráfico típico da força exercida na rutura da placa na face (longitudinal) e no verso (transversal), de onde foram obtidos os valores de força máxima para um conjunto de amostras.

A.10. Gráfico típico da força-deformação para as amostras das seguintes produções: 1309171502; 1309171609; 1409171025; 1409171127.

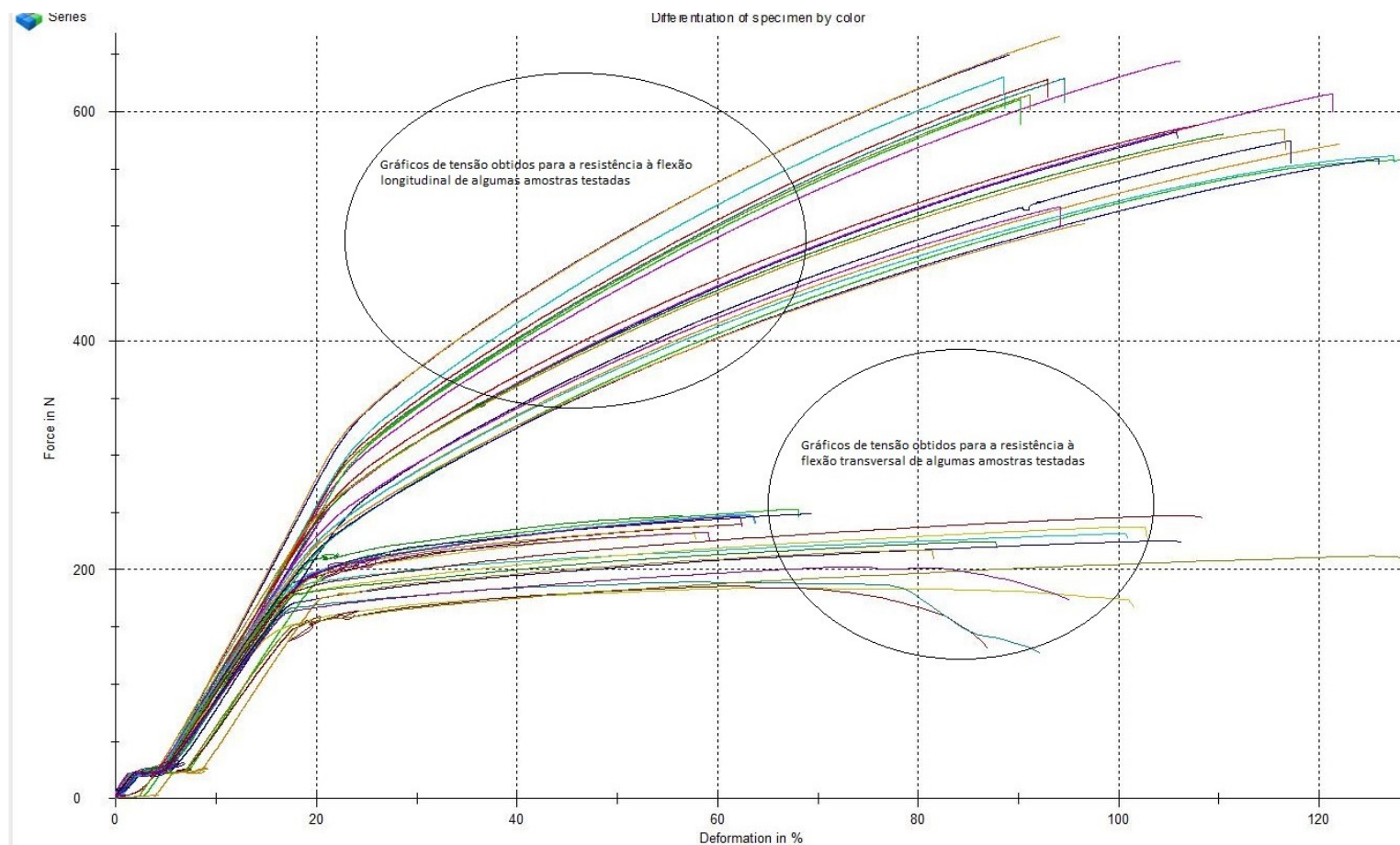


Figura 36-Gráfico típico da força exercida na rutura da placa na face (longitudinal) e no verso (transversal), de onde foram obtidos os valores de força máxima para um conjunto de amostras.

